

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

IOT SYSTÉM PRO ZAHRÁDKÁŘE

IOT SYSTEM FOR GARDENING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Mičák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Čaha

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Petr Mlčák

ID: 195609

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

IoT systém pro zahrádkáře

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Realizujte meteostanici pro měření teploty, vlhkosti, atmosferického tlaku, rychlosti a směru větru, množství deštových srážek a půdní vlhkosti a teploty (v několika hloubkách). Využijte mikrokontrolér ESP32 nebo podobný pro bezdrátový přenos dat. Data budou dostupná přes jednoduché webové rozhraní, ve formě strojově zpracovatelných dat (XML nebo JSON) pro příp. další zpracování (historie hodnot, apod.). Zařízení by mělo být napájeno Li-ion akumulátorem a dobíjeno FV panelem. Vytvořený kód vystavte pod licencí MIT na GitHub.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PFISTER, Cuno. Getting started with the Internet of things. Sebastapool, Calif.: O'Reilly Media, 2011. Make: projects. ISBN 978-1449393571.

[2] CHOU, Timothy Chen Kuang. Precision: principles, practices and solutions for the internet of things. [Spojené státy americké]: CrowdStory Publishing, [2020]. ISBN 978-1-329-84356-1.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Caha

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a vytvořením meteostanice vhodné pro zahrádkáře. Vytvořené zařízení je schopno měřit teplotu, tlak, vlhkost vzduchu, množství srážek, rychlost a směr větru, UV index a rovněž teplotu a vlhkost půdy v několika hloubkách. Meteostanice je napájena z akumulátoru s pomocným dobíjením z fotovoltaického panelu. Práce je rozdělena do několika částí. V teoretické části jsou popsány jednotlivé fyzikální principy měření uvažovaných veličin. Následně je provedeno srovnání dostupných senzorů a poté proveden jejich finální výběr. Třetí část se zabývá návrhem a realizací hardwarového zapojení včetně vytvoření DPS. V této kapitole jsou rovněž navrženy držáky jednotlivých senzorů pro vytištění na 3D tiskárně, které jsou následně vytištěny. Čtvrtá část se zabývá problematikou vývoje software, který je blíže popsán. Nakonec je celá meteostanice sestavena, zapojena a je ověřena funkčnost všech komponent pomocí zasílání naměřených dat na Thingspeak.

KLÍČOVÁ SLOVA

IoT systém pro zahrádkáře, teplota, tlak, vlhkost, vítr, srážky, UV index, vlhkost půdy, bateriový provoz, ESP32

ABSTRACT

The thesis deals with the design and creation of a weather station suitable for gardeners. The created device is able to measure temperature, pressure, humidity, amount of precipitation, wind speed and direction, UV index and also temperature and soil moisture at several depths. The weather station is powered by a battery with auxiliary charging from a photovoltaic panel. The thesis is divided into several parts. The theoretical part describes the individual physical principles of measurement of the considered physical quantities. Subsequently, a comparison of available sensors is made and then a final selection is made. The third part deals with the design and implementation of the hardware circuitry including the creation of the PCB. In this section, the holders of each sensor are also designed for printing on a 3D printer, which are then printed. The fourth section deals with software design issues, which is described in more detail. Finally, the whole weather station is assembled, wired and the functionality of all components is verified by sending the measured data to Thingspeak.

KEYWORDS

IoT system for gardening, temperature, pressure, humidity, wind, rainfall, UV index, soil moisture, battery powered, ESP32

MLČÁK, Petr. *IoT systém pro zahrádkáře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2021, 80 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Čaha

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Petr Mičák
VUT ID autora: 195609
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: IoT systém pro zahrádkáře

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Cahovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	14
1 Měřené veličiny	15
1.1 Teplota	15
1.1.1 Teplotní stupnice	15
1.1.2 Metody měření teploty	15
1.2 Tlak	16
1.2.1 Metody měření tlaku	17
1.3 Vlhkost	18
1.3.1 Metody měření vlhkosti plynu	18
1.3.2 Metody měření vlhkosti půdy	19
1.4 Vítr	20
1.4.1 Metody měření rychlosti větru	20
1.4.2 Metody měření směru větru	21
1.5 Srážky	21
1.5.1 Metody měření srážek	22
2 Porovnání a výběr vhodných senzorů	23
2.1 Senzory teploty	23
2.2 Senzory vlhkosti	24
2.3 Senzory tlaku	25
2.4 Senzory vlhkosti půdy	25
2.5 Volba senzorů	26
2.5.1 Sdružený senzor pro měření teploty, tlaku, vlhkosti	26
2.5.2 Senzor pro měření teploty půdy	26
2.5.3 Senzor pro měření vlhkosti půdy	27
2.5.4 Senzor rychlosti větru	27
2.5.5 Senzor směru větru	28
2.5.6 Senzor množství dešťových srážek	29
2.5.7 Senzor UV záření	30
3 Návrh hardwarové části zařízení	31
3.1 Výběr mikrokontroléru	31
3.2 Napájení	31
3.3 Volba stabilizátoru	33
3.4 Odpojování senzorů	33
3.5 Měření napětí baterie	34

3.6	Měření rychlosti větru a množství srážek	35
3.6.1	Volba čítače	35
3.6.2	Výsledné zapojení	36
3.7	Měření směru větru	37
3.8	Měření vlhkosti půdy	39
3.9	DPS	39
3.10	Ochranná krabice senzoru vlhkosti půdy	42
3.11	Držák anemometru a směrovky	43
3.12	Držák srážkoměru	44
3.13	Radiační štít	45
3.14	Držák solárního panelu	46
3.15	Centrální jednotka	47
4	Vývoj softwarové části zařízení	49
4.1	Webové rozhraní	49
4.1.1	Pracovní režimy meteostanice	49
4.1.2	Výchozí webová stránka	49
4.1.3	Stránka s daty v podobě JSON	49
4.1.4	Konfigurační stránka	50
4.1.5	Funkce pro obsluhu požadavků webového rozhraní	52
4.2	Kalibrace A/D převodníku	55
4.3	Kalibrace senzorů vlhkosti půdy	56
4.4	Ukládání a načítání konfigurace	60
4.4.1	Ukládání konfigurace	60
4.4.2	Načítání konfigurace	61
4.5	Vyčítání dat ze senzorů půdní vlhkosti	61
4.6	Vyčítání rychlosti větru a množství srážek	65
4.7	Automatizovaný sběr naměřených dat	66
4.7.1	Zasílání dat na Thingspeak	66
4.7.2	Zasílání dat na vlastní server	67
5	Otestování funkčnosti zařízení	68
5.1	Test funkčnosti	68
5.2	Měření spotřeby	70
	Závěr	71
	Literatura	72
	Seznam symbolů a zkratk	75

Seznam příloh	76
A Schéma centrální jednotky	77
B Schéma DPS s Attiny85	78
C Obsah elektronické přílohy	79

Seznam obrázků

1.1	Senzor rezistivity půdy	20
1.2	Příklad anemometru	21
1.3	Příklad srážkoměru	22
2.1	Senzor teploty, tlaku a vlhkosti	26
2.2	Senzor teploty půdy	27
2.3	Senzor vlhkosti půdy	27
2.4	Použitý anemometr	28
2.5	Snímač směru větru	29
2.6	Vnitřní část srážkoměru	30
2.7	Srážkoměr	30
2.8	Senzor UV záření	30
3.1	Mikrokontrolér ESP32	32
3.2	Solární panel	32
3.3	Regulátor nabíjení CN3791	33
3.4	Odpojování senzorů	34
3.5	Zapojení měření napětí baterie	35
3.6	Vyhlažovací obvod se Schmittovým KO	37
3.7	Zapojení čítače	37
3.8	Zapojení posuvného registru	37
3.9	Napěťový dělič	38
3.10	Náhled navržené DPS s ESP32	40
3.11	Náhled navržené DPS s Attiny85	40
3.12	Osazená DPS s ESP32	41
3.13	Osazená DPS s Attiny85, horní strana	41
3.14	Osazená DPS s Attiny85, spodní strana	41
3.15	Náhled navržené ochranné krabičky senzoru	42
3.16	Ochranná krabička senzoru vlhkosti po osazení a vylití	43
3.17	Náhled sestavy držáků směrovky a anemometru	43
3.18	Držák anemometru a směrovky	44
3.19	Náhled držáku srážkoměru	44
3.20	Držák srážkoměru	44
3.21	Náhled radiačního štítu	45
3.22	Uchycení modulu s BME280 v radiačním štítu	46
3.23	Radiační štít	46
3.24	Držák solárního panelu	47
3.25	Zkompleťovaná krabička	48
4.1	Výchozí webová stránka	50

4.2	Konfigurační stránka	51
4.3	Srovnání průběhu A/D převodníku s ideálním průběhem	55
4.4	Závislost odchylky A/D převodníku na naměřené hodnotě	56
4.5	Kalibrace senzorů	57
4.6	Závislost odezvy senzorů na vlhkosti půdy	58
5.1	Naměřená teplota a vlhkost	68
5.2	Naměřený tlak, rychlost a směr větru a UV index	69
5.3	Naměřené srážky	69
5.4	Napětí baterie	70

Seznam tabulek

2.1	Senzory teploty	23
2.2	Senzory teploty	24
2.3	Senzory tlaku	25
2.4	Rezistivita snímače dle natočení	29
4.1	Kalibrační rovnice senzorů	58

Seznam výpisů

4.1	Naměřená data ve formátu JSON	50
4.2	Obsluha požadavku na výchozí stránku.	52
4.3	Aktualizace seznamu WiFi sítí, část 1.	53
4.4	Aktualizace seznamu WiFi sítí, část 2.	54
4.5	Funkce na linearizaci A/D převodníku.	56
4.6	Funkce na zjištění půdní vlhkosti.	59
4.7	Část funkce na ukládání konfigurace do souboru thingspeak.txt . . .	60
4.8	Část funkce na načítání konfigurace ze souboru thingspeak.txt . . .	61
4.9	Zasílání dat z Attiny 85, část 1.	62
4.10	Zasílání dat z Attiny 85, část 2.	62
4.11	Proměnné pro vyčítání dat v centrální jednotce	63
4.12	Vyčítání dat v centrální jednotce, část 1.	64
4.13	Vyčítání dat v centrální jednotce, část 2.	65
4.14	Vyčítání dat v centrální jednotce, část 3.	65
4.15	Přepočet rychlosti větru	66
4.16	Nastavení polí pro odeslání dat na Thingspeak	67
4.17	Uložení údajů k odeslání na vlastní server	67

Úvod

V dnešní době nejsou běžně dostupné meteostanice schopné měřit kromě atmosférických dat také údaje o půdě. Pro potřeby zahrádkářů ale nestačí znát pouze veličiny jako je teplota, tlak, vlhkost vzduchu, množství srážek, nebo rychlost a směr větru, ale především teplotu a vlhkost půdy.

Tato práce se zabývá návrhem a realizací IoT (Internet of Things) systému pro zahrádkáře. Zařízení bude umožňovat měření teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu, dále směr a rychlost větru, množství dešťových srážek a UV index. Rovněž bude schopno měřit teplotu a vlhkost půdy a to ve třech hloubkách. Aby bylo umožněno umístění na libovolném místě, systém bude napájen z baterie s dobíjením prostřednictvím fotovoltaického panelu.

Text je rozdělen do pěti kapitol. V první kapitole jsou popsány jednotlivé fyzikální veličiny a jsou zde nastíněny i některé z možností jejich měření.

Druhá kapitola se zabývá problematikou ohledně výběru senzorů, některé senzory jsou navzájem porovnány z hlediska přesnosti, spotřeby, nebo ceny. Na konci kapitoly je proveden finální výběr.

Třetí kapitola se věnuje hardwarovému návrhu. Je zde rozebrána tvorba výsledného zapojení, uvedeny jsou i některé přednosti návrhu. Součástí této kapitoly je i návrh výsledné DPS. Rovněž jsou uvedeny navržené a následně na 3D tiskárně vytištěné držáky jednotlivých senzorů.

Čtvrtá kapitola se týká software. Jsou zde rozebrány vybrané funkce pro měření dat z jednotlivých senzorů. Dále je zde uvedena problematika ohledně kalibrace A/D převodníku a kalibrace půdních senzorů vlhkosti. V této kapitole je rozebrána například i možnost konfigurace celé meteostanice nebo formy zasílání naměřených dat.

Poslední kapitola popisuje výsledné zařízení. Obsahuje především test funkčnosti a měření spotřeby.

1 Měřené veličiny

V této kapitole jsou rozebrány měřené veličiny. Jednotlivé veličiny jsou stručně popsány z fyzikálního hlediska a doplněny o možnosti měření.

1.1 Teplota

Teplota je stavová fyzikální, kterou se určuje stav termodynamické rovnováhy. Tato rovnováha nastane, jakmile v soustavě těles izolované od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, kterými je stav této soustavy popsán, nezávisí na čase, tedy že všechna tělesa v této soustavě mají stejnou teplotu. Termodynamická rovnováha bývá charakterizována termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy těles [1].

1.1.1 Teplotní stupnice

Termodynamická teplotní stupnice je založena na termodynamické absolutní nule. Základní jednotkou teploty v této stupnici je Kelvin (K). Kelvin byl definován na základě termodynamické teploty tzv. trojného bodu, což je rovnovážný stav tří skupenství vody (ledu, vody a páry), jako vhodného referenčního a reprodukovatelného teplotního bodu termodynamické stupnice. Teplota trojného bodu byla pevně stanovena na hodnotu $T = 273,16$ K. Jeden kelvin je definován jako podíl $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody [1].

Celsiova stupnice je založena na Kelvinově termodynamické stupnici posunutím o teplotu 273,15 K. Jednotkou stupnice je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Pro Celsiovu stupnici platí, že teplota t je rovna rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K, tedy

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K} [1]. \quad (1.1)$$

Poslední běžně používanou stupnicí je Fahrenheitova stupnice. K převodu na Fahrenheitovu teplotu platí vztah [1]

$$t (^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32, \quad (1.2)$$

kde T je teplota v Kelvinech a t je teplota ve stupních Celsia.

1.1.2 Metody měření teploty

Měření teploty se provádí senzorem teploty nazývaným teploměr. Jedná se o funkční prvek tvořící vstupní část měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Dle fyzikálního principu lze senzory rozdělit na odporové, termoelektrické,

polovodičové, dilatační, optické a další. Dle styku s měřeným prostředím se senzory dělí na dotykové a bezdotykové [1].

Kovové odporové senzory teploty

Odporová kovová čidla teploty fungují na principu teplotní závislosti odporu kovu. Kov si můžeme představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a chaoticky se pohybujících elektronů. Při zvyšování teploty kovu se zvětšují kmity iontů, což způsobuje růst odporu pro elektrony procházející danou strukturou [1].

Polovodičové odporové senzory teploty

U polovodičových odporových sensorů se využívá stejně jako u kovových odporových sensorů teplotní závislosti odporu. U těchto sensorů je dominantní závislostí koncentrace nosičů náboje n na teplotě.

Negastory se vyrábí s běžnými teplotními rozsahy od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale i s extrémními rozsahy od $+4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při měření teploty se obvykle používají právě NTC termistory a v literatuře a katalozích se pod pojmem termistor obvykle označuje právě NTC termistor.

Pozistory jsou termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Využití pozistory nacházejí především v elektrických obvodech jako funkce tepelné ochrany, omezovače proudu, teplotní regulace apod.

Polovodičové odporové senzory se dělí na termistory (negastory NTC a pozistory PTC) a monokrystalické odporové senzory [1].

PN senzory teploty

Tyto senzory nejčastěji využívají teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Mívají teplotní rozsah od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ s nejistotou měření z rozsahu 0,6 % až 2 %. Dělí se dle provedení na diodové PN senzory, tranzistorové a monolitické (integrované) [1].

1.2 Tlak

Obecně je tlak síla působící na plochu. Základní jednotkou tlaku je Pascal (Pa), což je tlak, který vytvoří síla o velikosti 1 N působící na plochu 1 m^2 , přičemž $1\text{ Pa} = 1\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$. Další jednotkou, která se běžně používá, je například bar, $1\text{ bar} = 10^5\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozeznáváme několik druhů tlaku. Prvním je absolutní tlak, který se měří vůči ideálnímu vakuu, tj. od nuly. Atmosférický tlak je absolutní tlak

tvořený tlakem zemské atmosféry, který se měří u zemského povrchu. Relativní tlak je měřený vůči atmosférickému tlaku. Lze se setkat i s pojmem diferenční tlak, což je rozdíl hodnot dvou současně působících tlaků mezi dvěma různými body [2].

1.2.1 Metody měření tlaku

Při měření tlaku je možné vystavit působení tlaku známou plochu a tím převést měření tlaku na měření síly. Mezi možné metody měření se řadí membránové, kapacitní, piezoelektrické, odporové, optoelektronické a další [2].

Membránové deformační senzory tlaku

Membránové senzory tlaku využívají membrány nejrůznějších provedení. Tyto membrány se tlakem deformují a působí na tenzometry. Velmi vhodným tenzometrem je fóliová rozeta. Další variantou membránových senzorů jsou monolitické integrované senzory tlaku. Zde se využívá křemíkové membrány s tloušťkou jen několika μm . Mezi výhody lze zařadit možnost vyrobit senzor s velmi malými rozměry (například senzor o průměru 3,2 mm a tloušťce 0,8 mm), dobré dynamické vlastnosti (vysoká rezonanční frekvence membrány) a nízké výrobní náklady [2].

Kapacitní senzory tlaku

Kapacitní senzory se skládají ze dvou elektrod. Jedna z nich je pružná a je tvořena kovovou membránou. Druhá elektroda je pevně uchycena na izolovaném držáku vůči pružné membráně. Následný průhyb membrány způsobuje změnu vzduchové mezery obou elektrod a tím změnu kapacity. Kapacitní senzory tlaku mají nicméně omezenou použitelnost z důvodu teplotní dilatace a nelineární závislosti kapacity na tlaku. Obvykle se využívají jako diferenční senzory tlaku, jelikož zde je možno potlačit vlivy souhlasně působící na obě části, jako je například teplotní dilatace [2].

Piezoelektrické senzory tlaku

U piezoelektrických senzorů se využívá pružné membrány, která převádí tlakové účinky na deformaci několika v sérii uspořádaných piezoelektrických disků. Jako materiál pro výrobu se používají obvykle krystaly křemene, které jsou relativně levné na výrobu. V případě nutnosti měření nižších tlaků v prostředích s vibracemi senzory obsahují ještě kompenzační akcelerometr, kterým lze do jisté míry potlačit vliv vibrací na přesnost měření [2].

Optoelektronické deformační senzory tlaku

Existují v mnoha modifikacích, jednou z nich je například varianta senzoru tlaku s optickými vlákny. Zde se využívá změny útlumu vlákna při mikroohybech. Vláknem vede hřebínkem s určitou vzdáleností zubů, pro vlákno o poloměru 60 μm jsou vhodné 3 mm rozestupy. Tlakové síly působící na tento hřebínek způsobují mikroohyby optického vlákna, čímž se změní geometrie rozhraní jádro-plášť a část svazku se neodrazí od rozhraní, čímž dojde ke zvýšení útlumu. Tyto senzory jsou vhodné zvláště pro použití při vyšších teplotách do 400 °C, nebo v aplikacích, kde senzor nesmí mít kovové části [2].

1.3 Vlhkost

Vlhkost vzduchu je způsobena vodní párou v atmosféře. Čím vyšší je teplota vzduchu, tím více je vzduch schopen pojmout vodní páry. Pokud následně teplota poklesne takovým způsobem, že již vzduch původní vlhkost nepojme, dojde k vyloučení přebytku ve formě zkapalněné vodní páry. Tento děj nastává při dosažení rosného bodu, což znamená, že je relativní vlhkost vzduchu 100 % [3].

Relativní vlhkost vzduchu je nejčastěji používaná veličina k měření vlhkosti vzduchu. Udává poměr mezi napětím vodní páry a napětím nasycené vodní páry při stejné teplotě vzduchu. Jinými slovy ukazuje poměr mezi aktuálním nasycením vzduchu vodní párou a maximálním nasycením při dané teplotě. Při změně teploty se nemění nasycení vzduchu vodními parami, ale mění se maximální množství páry, které je vzduch schopen pojmout. Tím pádem se při změně teploty mění i relativní vlhkost, kdy se vzduch stává relativně sušším nebo vlhčím. Samotná veličina je bezrozměrná, ale obvykle se po vynásobení 100 udává v procentech [3].

Absolutní vlhkost vzduchu se v praxi tolik nevyužívá. Udává hmotnost vodní páry obsažené v jednotkovém objemu vlhkého vzduchu, což je směs suchého vzduchu a vodní páry. Jednotkou absolutní vlhkosti je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [3].

1.3.1 Metody měření vlhkosti plynu

Při vyjádření vlhkosti je nutno znát teplotu a tlak směsi a také tzv. vlhkostní veličinu. Touto veličinou je například výše uvedená relativní nebo absolutní vlhkost vzduchu, dále směšovací poměr vodní páry v plynu v daném objemu, teplota rosného bodu apod. Možnými typy senzorů pro měření vlhkosti jsou například sorpční senzory vlhkosti, psychrometry, nebo zrcadlové senzory teploty rosného bodu [2].

Sorpční senzory vlhkosti

Využívají změn fyzikálně-chemických vlastností materiálů v závislosti na rovnovážném stavu adsorpce a desorpce molekul vody z vodní páry. Řadí se sem například odporové, kapacitní, polovodičové a další senzory [2].

Psychrometry

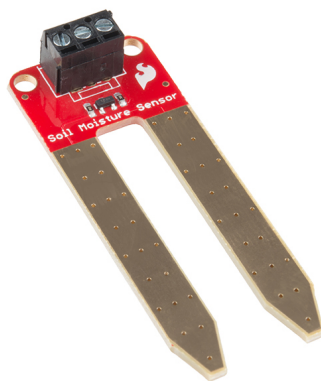
Psychrometry se stanovuje parciální tlak vodní páry v měřeném vzduchu za pomoci údajů z dvou senzorů teplot, tzv. mokrého a suchého senzoru. Z mokrého senzoru, který je stále vlhčen, se odpařuje voda a tím se odebírá výparné teplo z jeho okolí, což způsobuje pokles teploty mokrého senzoru. Čím nižší je relativní vlhkost, tím více se odpařuje voda a tím větší je tzv. psychrometrický rozdíl teplot obou senzorů. Konstrukčně je mokrý senzor teploty obalen mokrou punčoškou, která je trvale ovlhčována vodou z pomocné nádoby. Suchý senzor průběžně měří teplotu analyzovaného vzduchu. Relativní vlhkost se vypočítá obvykle z psychrometrických tabulek na základě psychrometrického rozdílu teplot [2].

1.3.2 Metody měření vlhkosti půdy

Pro měření vlhkosti půdy se používá mnoho různých technik založených na odlišných fyzikálních principech. Mezi možné senzory patří mimo jiné senzory rezistivity půdy, tenzometry, techniky TDR (Time Domain Reflectometry) a FDR (Frequency Domain Reflectometry), nebo kapacitní senzory [4].

Senzory rezistivity půdy

Využívají principu, že při zvyšování vlhkosti půdy se snižuje její rezistivita. Jednou z možných realizací je měření rezistivity mezi dvěma elektrodami. Elektrody mohou být umístěny v porézním materiálu, kterým bývá sádra, laminát, keramika nebo nylon. Jakmile je senzor vložen do půdy, postupně dojde k vyrovnání vlhkosti porézního materiálu a půdy. Následně se změří rezistivita mezi elektrodami. Senzor je nutno zkalibrovat vytvořením kalibrační křivky závislosti rezistivity na vlhkosti půdy. Výhody při použití porézního materiálu spočívají v nízké ceně a možnosti použití senzoru dlouhodobě na stejném místě. Nevýhodou je nutnost kalibrace a nemožnost použití ve slané půdě [4]. Příklad senzoru rezistivity půdy je na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Senzor rezistivity půdy. Převzato z [5].

Kapacitní senzory

Kapacitní snímače se skládají ze dvou částí. První, vyhodnocovací část obsahuje oscilační obvod. Druhá, měřicí část se vloží do půdy. Měřicí část obsahuje pár elektrod, které mohou být uspořádány paralelně, nebo v podobě kruhových kroužků. Tyto elektrody tvoří kapacitor, přičemž jako dielektrikum slouží půda. Oscilační obvod tvoří společně s vzniklým kapacitorem uzavřený obvod. Měření vlhkosti půdy probíhá ve formě zjišťování doby nabíjení tohoto kapacitoru. Změny vlhkosti půdy jsou detekovány jako změny v pracovní frekvenci vzniklého obvodu. Tato frekvence bývá typicky v rozsahu 10–150 MHz [4].

1.4 Vítr

Vítr je základní meteorologický prvek, který popisuje pohyb vzduchu v určitém místě v daném okamžiku. Pohyb vzduchu se měří vzhledem k zemskému povrchu. U větru se určuje rychlost a směr. Směrem větru se udává, odkud vítr vane a měří se obvykle v úhlových stupních, kterým jsou přiřazeny světové strany. Rychlost se udává v metrech za sekundu nebo v kilometrech za hodinu [6].

1.4.1 Metody měření rychlosti větru

K měření rychlosti větru se používají tzv. anemometry. Anemometry mohou fungovat na několika různých principech, nejrozšířenějšími a zároveň levnými na výrobu jsou mechanické anemometry. Vlivem větru se roztáčí miskové lopatky a rychlost větru se určí z počtu otáček za jednotku času. K výpočtu obvykle slouží převodní konstanta pro daný anemometr, například jedna otáčka za sekundu znamená rychlost větru 2,4 km/h. Možná varianta mechanického anemometru s miskovými lopatkami je na obrázku 1.2. Dalším typem jsou například aerodynamické anemometry. Zde

se rychlost větru určí z rozdílu mezi dynamickým tlakem ve speciálně konstruované aerodynamické trubici obtékané vzduchem a statickým tlakem v této trubici za bezvětří. Existují ještě i zchlazovací anemometry, ultrazvukové anemometry a další [6].



Obr. 1.2: Mechanický anemometr. Převzato z [7].

1.4.2 Metody měření směru větru

K určení směru větru se používají větrné směrovky. Bývají instalovány nejčastěji ve výšce 10 m nad zemí z důvodu minimalizace vlivu okolních překážek a terénu. Mezi možné metody určování směru větru patří například metoda s potenciometrem. V závislosti na natočení směrovky se mění rezistivita potenciometru, což je následně vyhodnoceno a určen směr větru [8]. Další možností je využití jazýčkových kontaktů, které mohou připojovat do obvodu rezistory v závislosti na natočení směrovky. Některé směrovky využívají ke své činnosti rotačních enkodérů a další.

1.5 Srážky

Atmosférické srážky jsou vodní kapky nebo ledové částice vznikající následkem kondenzace nebo desublimace vodní páry. Jedná se o veškerou vodu obsaženou v atmosféře v kapalném nebo pevném skupenství, která vypadává z oblaků. Označením srážkový úhrn se rozumí výška vodního sloupce spadlých srážek za určitý časový úsek a udává se typicky v mm/hod, mm/den nebo mm/rok. Jeden milimetr srážek odpovídá jednomu litru vody spadlé na plochu 1 m^2 [9].

1.5.1 Metody měření srážek

K měření srážkových úhrnů se používají srážkoměry - hyetometry. Konstrukčně se jedná například o válec nebo kvádr s nálevkou. Dopadající srážky na plochu okolo nálevky jsou sváděny nálevkou dovnitř nádoby. Srážkoměry mohou být jednak manuálního typu, obvykle ve tvaru válce se stupnicí. Obsluha následně zjistí množství srážek za daný časový úsek. Jednoduchý manuální srážkoměr je zobrazen na obrázku 1.3. Dále existují srážkoměry automatizované, které převádí množství srážek



Obr. 1.3: Manuální srážkoměr. Převzato z [10].

do digitální podoby, čímž je usnadněno další zpracování dat. Pokud je třeba měřit sněhové nebo jiné tuhé srážky, nechají se nejprve roztát a následně se měří stejným způsobem jako běžné dešťové srážky [9].

2 Porovnání a výběr vhodných senzorů

Tato kapitola se věnuje výběru senzorů k měření požadovaných veličin. U některých senzorů je provedeno srovnání dostupných typů. Součástí kapitoly je rovněž i popis vybraných senzorů z pohledu funkce a komunikace s procesorem.

2.1 Senzory teploty

Na trhu existují různé snímače teploty od plně digitálních vybavených komunikačním rozhraním, jako je například I2C (Inter-Integrated Circuit) nebo 1-Wire až po analogové třeba v podobě termistorů. Vzájemně se liší přesností měření, rozlišením, cenou nebo spotřebou. V tabulce 2.1 jsou uvedeny některé senzory spolu s jejich hlavními vlastnostmi.

Tab. 2.1: Senzory teploty

Kritérium	DHT22	BME280	DS18B20
Přesnost	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Rozsah měření	$-40\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-55\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}$
Spotřeba	1,5 mA	350 μA	1 mA
Rozhraní	proprietární	I2C, SPI	1-Wire
Cena	140 Kč	150 Kč	130 Kč

DHT22 je senzor teploty od různých výrobců. Jedná se o poměrně rozšířený senzor především díky jednoduchosti použití. Mezi jeho nevýhody patří ale relativně vysoká spotřeba 1,5 mA, dlouhá doba měření 2 s a kvůli proprietárnímu rozhraní není možno připojit více senzorů na jednu sběrnici. Z důvodu absence relevantního data-sheetu nelze dohledat, při jakém rozsahu teplot je dosaženo přesnosti $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11].

BME280 od firmy Bosch Sensortec představuje další možnost měření teploty. Udávaná přesnost $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu 0 až $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, respektive $\pm 1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu -20 až $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je dostatečná pro použití v aplikacích, kde není požadavek na vysokou přesnost kritickým parametrem. Výhodou je nízká spotřeba 350 μA a rovněž možnost použití sběrnice Inter-Integrated Circuit nebo SPI (Serial Peripheral Interface), díky čemuž je možno připojit ke sběrnici další zařízení podporující I2C nebo SPI. Mezi nevýhody lze zařadit nižší udávanou přesnost [12].

Posledním uvedeným senzorem je DS18B20 firmy Maxim Integrated. Tento snímač vyniká velmi dobrou udávanou přesností měření $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu -10 až $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každý DS18B20 má z výroby zapsanou unikátní 64 bitovou adresu, díky

čemuž je v kombinaci s 1-Wire sběrnici umožněno použít větší množství senzorů na jediné sběrnici, což je velmi výhodné pro aplikace s požadavkem na měření teploty na více místech najednou. Nevýhodou je vyšší spotřeba 1 mA při měření. Na trhu existuje DS18B20 kromě standardního provedení ve formě pouzder TO-92 nebo například SOIC-8 i v podobě vodotěsné sondy s kabelem o délce až 10 metrů. Toto provedení je velmi výhodné pro aplikace jako je měření teploty vody, nebo například měření teploty půdy [13].

2.2 Senzory vlhkosti

I v oblasti měření vlhkosti vzduchu trh nabízí různé množství senzorů. Podobně jako u snímačů teploty i zde se jednotlivé typy liší přesností, spotřebou, komunikačním rozhraním apod. Některé senzory navíc umožňují i měření jak teploty tak i vlhkosti vzduchu, což je poměrně výhodné, jelikož se snižuje počet použitých komponent. Příkladem takových senzorů jsou již výše uvedené DHT22 a BME280. Tabulka 2.2 obsahuje srovnání vybraných senzorů.

Tab. 2.2: Senzory teploty

Kritérium	DHT22	BME280	SHTC3
Přesnost	± 2 %	± 3 %	± 2 %
Rozsah měření	0–100 %	0–100 %	0–100 %
Spotřeba	1,5 mA	340 μ A	430 μ A
Rozhraní	proprietární	I2C, SPI	I2C
Cena	140 Kč	150 Kč	160 Kč

Jelikož se jedná o stejný senzor, nevýhody v podobě vysoké spotřeby a dlouhé doby měření zůstávají stejné u DHT22. Pro měření vlhkosti nabízí dobrý rozsah měření 0–100 % relativní vlhkosti. Rovněž přesnost ± 2 % relativní vlhkosti je mezi podobnými senzory standardem [11].

Podobná situace je i u BME280, datasheet navíc specifikuje konkrétně spotřebu i při měření relativní vlhkosti, která je o zanedbatelných 10 μ A nižší, než při měření teploty. Tento senzor má o něco nižší přesnost ± 3 % relativní vlhkosti, která je však stále dostatečná pro orientační měření. Rozsah měření je stejný jako u DHT22, tedy 0–100 % relativní vlhkosti [12].

SHTC3 je senzor od firmy Sensirion. Disponuje rozhraním I2C, což má opět výhodu v možnosti připojení dalších zařízení k této sběrnici. Přesnost při měření vlhkosti jsou standardní ± 2 % relativní vlhkosti. I tento senzor disponuje rozsahem

měření 0–100 % relativní vlhkosti. SHTC3 rovněž umožňuje měření teploty podobně jako DHT22 a BME280 [14].

2.3 Senzory tlaku

Pro potřeby měření atmosférického tlaku bylo vybíráno z několika senzorů. Tabulka 2.3 obsahuje srovnání vybraných senzorů.

Tab. 2.3: Senzory tlaku

Kritérium	BMP388	BME280	MPL3115A2
Přesnost	$\pm 0,5$ hPa	$\pm 1,5$ hPa	± 4 hPa
Rozsah měření	300–1250 hPa	300–1100 hPa	200–1100 hPa
Spotřeba	700 μ A	714 μ A	40 μ A
Rozhraní	I2C, SPI	I2C, SPI	I2C
Cena	230 Kč	150 Kč	200 Kč

BMP388 firmy Bosch Sensortec je velmi přesný senzor tlaku s dobrou přesností $\pm 0,5$ hPa. Disponuje rozhraním I2C a SPI. Nevýhoda senzoru spočívá ve vyšší ceně. Rozsah měření je u všech senzorů dostatečný pro měření atmosférického tlaku [15].

BME280 byl probrán již v podkapitolách [2.1] a [2.2]. Umožňuje však i měření atmosférického tlaku, což z něj dělá velmi všestranný senzor. Při měření tlaku dosahuje přesnosti $\pm 1,5$ hPa [12].

Posledním zástupcem z možných snímačů tlaku je MPL3115A2 od NXP. Jednoznačnou výhodou senzoru je velmi nízká spotřeba, pouze 40 μ A. Nevýhodou je nižší přesnost měření ± 4 hPa a vyšší cena, přibližně 200 Kč. Senzor je vybaven sběrnici I2C pro komunikaci s procesorem [16].

2.4 Senzory vlhkosti půdy

V oblasti měření vlhkosti půdy není na poli senzorů zdaleka tak velký výběr, jako například v oblasti měření vlhkosti vzduchu. Některé techniky měření zmíněné v kapitole 1.3.2 jsou velmi finančně náročné a jsou vhodné spíše pro specializovaná měření, než pro potřeby měření vlhkosti půdy pro běžné uživatele. Finančně dostupné jsou pouze senzory rezistivity půdy a kapacitní senzory. U těchto senzorů platí, že obvykle nejsou dostupné žádné obsáhlé datasheety a aktuální nabídka se může měnit. Obecně ale zásadní rozdíl spočívá v životnosti obou řešení. U běžně dostupných senzorů využívajících měření rezistivity půdy dochází při měření k elektrolýze

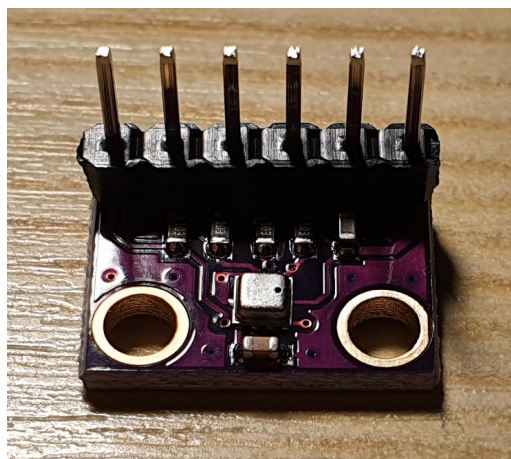
a následné korozi elektrod, což lze oddálit prohozením polarity při každém měření. Koroze elektrod způsobí postupnou změnu rezistivity a tím znehodnocení naměřených dat. Výhodou oproti kapacitním sensorům je zpravidla nižší cena. Kapacitní senzory výše popsaným jevem netrpí a jsou vhodnější na dlouhodobější měření.

2.5 Volba senzorů

V této kapitole je proveden finální výběr senzorů. Uvedeny jsou některé výhody i nevýhody vybraných senzorů, u některých snímačů je uveden princip činnosti.

2.5.1 Sdružený senzor pro měření teploty, tlaku, vlhkosti

Z důvodu všestranného využití díky možnosti měření teploty, vlhkosti i tlaku byl vybrán BME280. Nabízí dostatečnou přesnost všech měřených veličin spolu s nízkou spotřebou. Jedná se o levnější řešení, než použití více různých snímačů. Rovněž je zredukováno množství potřebných senzorů. Senzor je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Senzor teploty, tlaku a vlhkosti.

2.5.2 Senzor pro měření teploty půdy

Pro potřeby měření teploty půdy byl zvolen DS18B20 ve vodotěsném provedení. Tento senzor nabízí velmi dobrou přesnost měření a příznivou cenu. Nevýhodou je vyšší spotřeba při měřicím cyklu. Tento snímač je k vidění na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Senzor teploty půdy.

2.5.3 Senzor pro měření vlhkosti půdy

Zbývající měřenou veličinou je vlhkost půdy. Z důvodů popsaných v podkapitole 2.4 bylo rozhodnuto o použití kapacitního senzoru. Konkrétně byl vybrán typ HW-390. Senzor změřenou kapacitu v závislosti na vlhkosti půdy převede na výstupní napětí. Určitou nevýhodou je nutnost kalibrace senzoru. Za další nevýhodu lze považovat analogový výstup senzoru. Pro přenos na vzdálenost několika metrů je vhodné provést digitalizaci signálu, například pomocí A/D převodníku v procesoru a naměřenou hodnotu následně zaslat v digitální podobě k vyhodnocení. I přes uvedené nedostatky se jedná o nejvhodnější možnou alternativu z pohledu toho, co trh nabízí. Senzor se nachází na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Senzor vlhkosti půdy.

2.5.4 Senzor rychlosti větru

Pro měření rychlosti větru byl vybrán miskový snímač používaný meteostanicí WH 1080. Zásadní výhodou je jednoduchá konstrukce a z ní plynoucí příznivá cena a rov-

něž velmi dobrá dostupnost v podobě náhradního dílu k této stanici. Senzor se skládá z rotoru s permanentním magnetem a statoru s jazýčkovým relé. Rotor je opatřen miskovými lopatkami díky nimž při poryvu větru dojde k roztočení. Při otáčení dochází k přiblížení magnetu k jazýčkovému relé, čímž dojde k sepnutí kontaktů a při následném vzdálení k rozpojení kontaktů. Výstupem senzoru jsou tedy pulzy. Při znalosti počtu pulzů za určitý čas lze stanovit rychlost větru. U tohoto senzoru platí, že 1 pulz/s je roven rychlosti větru 2,4km/h. Anemometr je zachycen na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Použitý anemometr.

2.5.5 Senzor směru větru

I k zjišťování směru větru byl vybrán snímač coby náhradní díl k WH 1080, jelikož sdílí všechny výhody s anemometrem. Navíc tento snímač umožňuje připojení anemometru a díky tomu je možno oba senzory propojit s vyhodnocovací jednotkou pouze jedním kabelem. Tímto senzorem je možno měřit směr větru v 16 krocích. Využívá opět permanentní magnet v pohyblivé části a jazýčková relé v pevné části, kterých je 8. Těmito relé se při přiblížení magnetu připojuje do obvodu 8 různých rezistorů, které odpovídají 8 různým směrům, viz liché řádky tabulky 2.4. Hodnoty rezistivity na sudých řádcích tabulky 2.4 jsou získány výpočtem z paralelně připojených rezistorů a představují zbývajících 8 směrů. Díky možnosti současného připojení dvou rezistorů paralelně je docíleno právě 16 možných směrů. Snímač je vidět na obrázku 2.5.

Tab. 2.4: Rezistivita snímače dle natočení

Úhel natočení [°]	Směr	Odpor [Ω]
0	S	33k
22,5	SSV	6k57
45	SV	8k2
67,5	VSV	891R
90	V	1k
112,5	VJV	688R
135	JV	2k2
157,5	JJV	1k41
180	J	3k9
202,5	JJZ	3k14
225	JZ	16k
247,5	ZJZ	14k12
270	Z	270k
292,5	ZSZ	42k12
315	SZ	64k9
337,5	SSZ	21k88

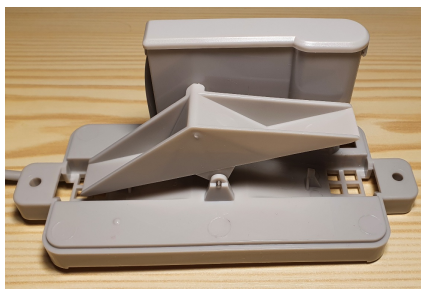


Obr. 2.5: Snímač směru větru.

2.5.6 Senzor množství dešťových srážek

Posledním použitým senzorem z meteostanice WH 1080 je srážkoměr. Jeho výhody jsou stejné jako u anemometru a snímače směru větru. Dešťové srážky jsou zachytávány horní stranou krytu ve tvaru nálevky a sváděny dovnitř srážkoměru. Ve vnitřní části se nachází kolébka se dvěma identickými mističkami a permanentním magnetem. V případě naplnění mističky srážkami dojde k překlopení kolébky, čímž se dostane pod nálevku druhá mistička a zároveň dojde k sepnutí jazýčkového relé,

které se nachází na statické části srážkoměru. Vnitřní uspořádání se nachází na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Vnitřní část srážkoměru

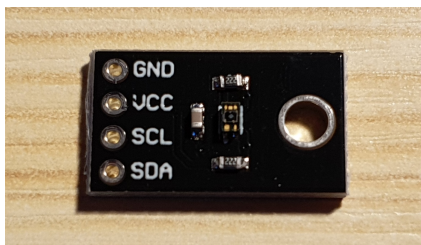
Výstupem srážkoměru jsou pulzy podobně jako u anemometru. Při znalosti počtu pulzů za daný časový úsek lze vypočítat úhrn srážek. U tohoto senzoru odpovídá jedno překlopení kolébky 0.28 mm srážek. Kompletní senzor je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Srážkoměr.

2.5.7 Senzor UV záření

Za účelem měření UV záření byl dodán vedoucím práce modul se senzorem VEML 6075 firmy Vishay [17]. Tento senzor umožňuje měřit UVA a UVB záření a díky tomu je možno zjistit index UV záření. Senzor se nachází na obrázku 2.8.



Obr. 2.8: Senzor UV záření.

3 Návrh hardwarové části zařízení

V této kapitole je proveden návrh zapojení DPS (Deska plošných spojů). Následně je DPS navržena, vyrobena a osazena. Součástí kapitoly je i návrh držáků pro vtištění na 3D tiskárně.

3.1 Výběr mikrokontroléru

Pro účely posílání naměřených dat je výhodné použití mikrokontroléru s možností připojení k WiFi Wireless Fidelity. Na tomto poli je již zavedeným hráčem firma Espressif. Tato firma nabízí dva základní mikroprocesory, ESP8266 a ESP32. Navíc je možno zakoupit přímo moduly obsahující jeden z těchto čipů. Dle provedení může modul obsahovat WiFi anténu na DPS, nebo U.FL konektor k připojení externí antény, případně i kombinace obou zmíněných.

ESP8266 byl uveden na trh v roce 2014. Vyznačuje se především nižší spotřebou, avšak zároveň relativně nízkým počtem GPIO (General-purpose input/output) pinů, navíc některé z těchto pinů navíc slouží k zvolení režimu při startu mikrokontroléru. Dle úrovně L nebo H na jednotlivých pinech je tak možno zvolit například režim nahrávání programu, nebo standardní režim. Jistou nevýhodou je rovněž přítomnost pouze jediného kanálu 10 bitového A/D převodníku.

ESP32 byl uveden v roce 2016. Oproti ESP8266 obsahuje vyšší počet GPIO pinů, avšak podobně jako u ESP8266 je využití některých z nich omezeno například pro volbu bootovacího režimu. Navíc obsahuje 2 A/D převodníky, označené jako ADC1 a ADC2. ADC1 obsahuje 8 kanálů, zatímco ADC2 10 kanálů. Oproti ESP8266 je navíc možno nastavit rozsah A/D převodníku až do úrovně napájecího napětí, čímž odpadá nutnost použití například napěťových děličů. Rozlišení A/D převodníků je v tomto případě 12 bitů. Napájecí napětí je u obou mikroprocesorů 3,3 V. Nakonec byl vybrán ESP32 z důvodu větší všestrannosti díky vyššímu množství GPIO pinů i vyššímu počtu A/D převodníků [18], [19]. Zvolena byla verze s U.FL konektorem pro externí anténu z důvodu lepšího příjmu WiFi signálu. Mikrokontrolér se nachází na obrázku 3.1.

3.2 Napájení

Zařízení bude napájené z baterie. Vedoucím práce byla k tomuto účelu dodána baterie Abaos 855085. Udávaná kapacita baterie je 4000 mAh, napětí baterie je 3,7 V. Jelikož napětí dosahuje při plném nabití 4,2 V, aby nedošlo ke zničení mikrokontroléru a ostatních komponent s napájecím napětím 3,3 V, je nutno použít stabilizátor napětí.



Obr. 3.1: Mikrokontrolér ESP32.

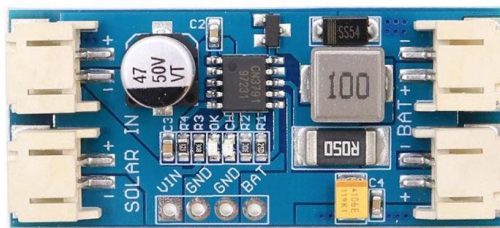
K průběžnému dobíjení baterie bude sloužit solární panel. Vedoucím práce byl dodán solární panel s výstupním napětím 6 V a maximálním výkonem 6 W. Solární panel je k vidění na obrázku 3.2. K nabíjení baterie ze solárního panelu je nutno



Obr. 3.2: Solární panel.

použít nabíjecí obvod. Průzkumem trhu bylo zjištěno, že výběr je v této oblasti velmi omezený. Dostupné integrované obvody pro nabíjení baterie ze solárního panelu jsou zpravidla v pouzdru neumožňujícím ruční zapájení. Například integrovaný obvod SPV 1040 firmy STMicroelectronics je dostupný v pouzdře pro ruční zapájení, bohužel ale umožňuje použití při vstupním napětí maximálně 5,5 V, což pro daný solární panel není dostačující.

S ohledem na omezený výběr bylo rozhodnuto o použití modulu pro nabíjení baterie. K tomuto účelu byl zvolen modul s integrovaným obvodem CN3791 z důvodu příznivé ceny a dostupnosti. Tento modul poskytuje maximální nabíjecí proud 2 A a je určen k nabíjení Li-Ion a Li-Pol jednočládkových baterií s napětím 3,7 V. Modul s regulátorem nabíjení je na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Regulator nabíjení CN3791. Převzato z [20].

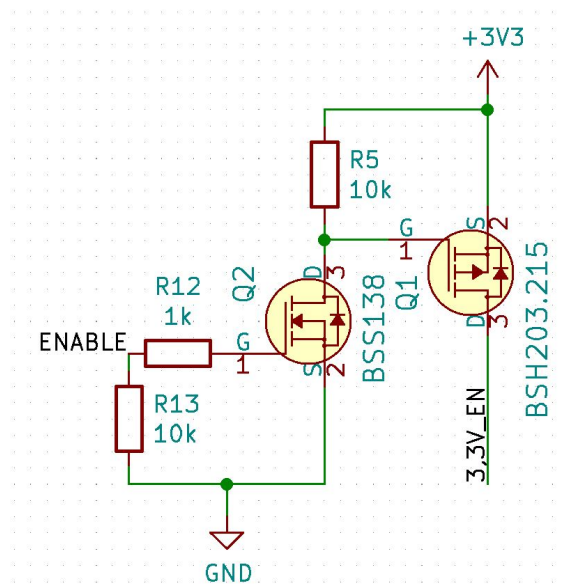
3.3 Volba stabilizátoru

Volbou stabilizátoru lze významně ovlivnit celkovou spotřebu zařízení. Velmi vhodné jsou stabilizátory typu ULDO Ultra-low dropout, které mají nízký pokles napětí mezi vstupem a regulovaným výstupem. Tato skutečnost je výhodná především při nízkém napětí baterie blízkém se napájecímu napětí komponent, jelikož se zvyšuje využitelná kapacita baterie, aniž by docházelo ke snižování napětí na výstupu stabilizátoru. Dalším velmi důležitým parametrem při napájení z baterie je nízká klidová spotřeba stabilizátoru. Z dostupných stabilizátorů byl zvolen XC6210B332MR firmy Torex [21]. Jedná se stabilizátor, který poskytuje nízký pokles napětí pouze 100 mV při proudu 200 mA. Rovněž nízká klidová spotřeba 35 μ A je velmi dobrá pro co možná nejvyšší snížení spotřeby. Maximální proud, který je stabilizátor schopen dodat do zátěže je minimálně 700 mA, což je dostatečná hodnota pro uvažovanou aplikaci, jelikož ESP32 dle datasheetu dosahuje spotřeby maximálně 240 mA v režimu zasílání dat přes WiFi.

3.4 Odpojování senzorů

Pokud by byly snímače stále připojeny, protékal by obvodem klidový proud. Některé senzory jako třeba BME280 nebo DS18B20 mají implementován režim spánku, avšak jiné, kterými jsou například snímač vlhkosti půdy HW-390, nebo senzor směru větru, tuto možnost nemají. Výsledkem je zvýšená spotřeba zařízení i ve chvíli, kdy není nutno měřit veličiny. Tato skutečnost je velmi nevýhodná zvláště při napájení z baterie. Bylo rozhodnuto o použití kombinace P-channel a N-channel MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor) tranzistorů pro účely odpojení senzoru. K připojení dojde pouze při měření, čímž dojde ke snížení spotřeby. Schema zapojení je na obrázku 3.4. Toto zapojení slouží k odpojování všech senzorů s výjimkou snímače množství srážek a rychlosti větru, u kterých je zapotřebí nepřetržité snímání.

V klidovém stavu je na elektrodě Gate N-MOSFET tranzistoru BSS138 napětí 0 V. Tuto skutečnost zajišťuje rezistor R13 zapojený jako pull-down. Napětí U_{GS} je



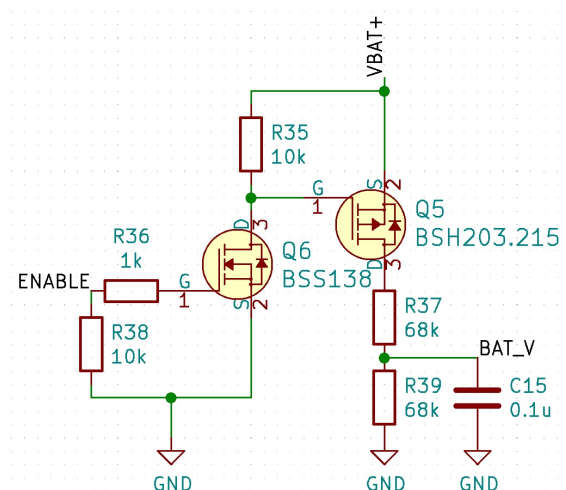
Obr. 3.4: Odpojování senzorů.

tedy rovněž 0 V a tím pádem je tento tranzistor uzavřen. Na Gate P-Mosfet tranzistoru BSH203 je přes pull-up rezistor R5 přivedeno napětí 3,3 V, tedy $U_{GS} = 0$ V a tento tranzistor je také uzavřen. Ve chvíli, kdy je nutno připojit senzory, je na pinu mikroprocesoru s označením ENABLE nastavena úroveň H odpovídající 3,3 V. Napětí U_{GS} tranzistoru BSS138 bude tedy 3,3 V, čímž vzroste nad prahové napětí $U_{GS(th)}$ a tranzistor se otevře. Napětí na Gate tranzistoru BSH203 $U_G \approx 0$ V, čímž i zde vzroste U_{GS} nad prahové napětí $U_{GS(th)}$ a tranzistor se otevře. V tomto zapojení není použití N-MOSFET tranzistoru nezbytně nutné, slouží zde pouze k obrácení logiky spínání. Zvolené tranzistory se navíc označují jako logic level, jedná se o tranzistory, které je možno ovládat již při nízkém napětí obvykle přímo z pinu mikroprocesoru. Tyto tranzistory mají oproti běžným MOSFET tranzistorům nižší prahové napětí $U_{GS(th)}$, při kterém se otvírají.

3.5 Měření napětí baterie

Při měření napětí baterie je využito odporového děliče, aby byl zajištěn převod napětí baterie, které může dosáhnout až 4,2 V na rozsah A/D převodníku, který má maximální měřené napětí 3,3 V. U tohoto zapojení nicméně platí, že by i zde při nepřetržitě připojeném děliči protékal klidový proud a způsobil zvýšení spotřeby. Z toho důvodu je použito podobné zapojení s N-MOSFET a P-MOSFET tranzistory, jako bylo uvedeno v podkapitole 3.4. Toto zapojení je pro lepší ilustraci uvedeno na obrázku 3.5.

Funkce obou tranzistorů byla podrobně popsána v podkapitole 3.4, proto zde



Obr. 3.5: Zapojení měření napětí baterie.

již nebude dále rozebírána. V tomto zapojení je odlišností připojování přímo napětí baterie, což je nezbytné pro účely jeho změření. Již zmíněný dělič napětí se zde skládá z rezistorů R37 a R39, jejichž hodnota byla zvolena tak, aby byl pokryt rozsah možného napětí baterie.

3.6 Měření rychlosti větru a množství srážek

Princip funkce anemometru a snímače množství srážek byl popsán v podkapitole 2.5.4, respektive 2.5.6. Jelikož výstupem obou snímačů jsou pulzy, je nutno měřit a ukládat počty pulzů za určitý čas, aby mohly být následně převedeny na rychlost větru, resp. množství srážek. Použitý mikrokontrolér umožňuje rozlišit pouze dvě externí probuzení, což není dostatečné, jelikož je nutno umožnit uživateli vymazat konfiguraci. Doba probouzení se pohybuje okolo 250 ms, což není dostatečné, jak bude uvedeno dále. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o použití externího čítače.

3.6.1 Volba čítače

Při výběru čítače bylo nutno zohlednit maximální naměřené úhrny srážek v ČR a maximální naměřenou rychlost větru v ČR. Z dostupných dat vyplývá, že nejvyšší naměřená rychlost větru v ČR byla 216 km/h a největší naměřený denní úhrn srážek 345 mm [22]. Nejvyšší hodinový úhrn srážek byl 71,6 mm [23]. Jeden pulz za sekundu použitého snímače větru odpovídá rychlosti větru 2,4 km/h, při maximální rychlosti větru 216 km/h je výsledná frekvence 90 pulzů/s. Uvažovaná perioda měření je 5 minut, což by při nepřetržitě foukajícím větru o rychlosti 216 km/h odpovídalo 27 000 pulzů za danou periodu. Aby nedošlo k přetečení čítače dříve, než budou

naměřené hodnoty uloženy v paměti mikrokontroléru, čímž by došlo k znehodnocení měření, je nutno zvolit minimálně 15 bitový binární čítač, který dokáže uložit $2^{15} - 1$ pulzů, tedy 32 767 pulzů.

V případě srážek je situace poněkud složitější, jelikož se obvykle udávají denní úhrny srážek a pouze zřídka hodiny. Intenzita srážek se navíc v průběhu času mění. Pro další výpočet budeme uvažovat jako nejhorší možný scénář úhrn srážek 100 mm/hod. U použitého srážkoměru odpovídá 0,28 mm srážek jednomu pulzu. V případě neměnné intenzity srážek srážkový úhrn 100 mm/hod odpovídá srážkovému úhrnu 8,3 mm za 5 minut. Jednoduchým výpočtem je možno získat 29,6, po zaokrouhlení 30 pulzů za 5 minut. V tomto případě by stačilo použít 5 bitový binární čítač umožňující uložení 31 pulzů.

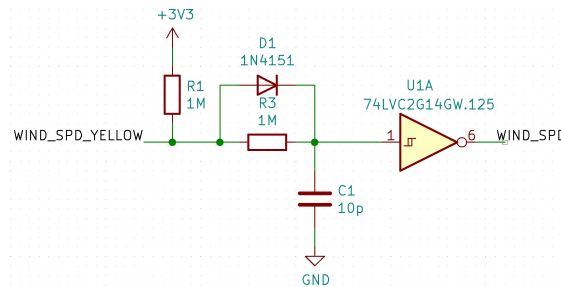
Jelikož se 15 bitové čítače nevyrobí, byl zvolen 16 bitový dvoukanálový binární čítač SN74LV8154PW firmy Texas Instruments [24]. Dva kanály jsou v tomto případě velmi vhodné pro měření počtu pulzů z anemometru i srážkoměru pomocí jednoho čítače. Navíc je díky 16 bitům možno uložit na každém kanálu 65 535 pulzů, což umožňuje případné prodloužení periody měření na 10 minut.

3.6.2 Výsledné zapojení

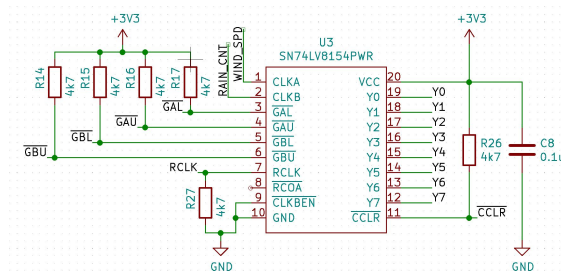
Použité senzory využívají při své činnosti jazýčková relé, která při sepnutí a rozepnutí způsobují zákmity podobně jako mechanická tlačítka. Z toho důvodu bylo zapotřebí pro bezproblémovou funkci použití vyhlazovacího obvodu. Tento obvod sice vyhladí zákmity, avšak zároveň prodlouží náběžnou a sestupnou hranu signálu. Datasheet čítače SN74LV8154PW doporučuje pro pomaleji se měnící vstupní signály využít Schmittův klopný obvod. Použitím Schmittova klopného obvodu dojde ke zvýšení strmosti náběžné a sestupné hrany, což je v tomto případě žádoucí. Jako Schmittův klopný obvod byl zvolen 74LVC2G14GW.125 firmy Nexperia [25], jelikož obsahuje dva kanály, které jsou použity jednak v zapojení pro měření pulzů ze srážkoměru a jednak pro měření pulzů z anemometru. Zapojení vyhlazovacího obvodu spolu se Schmittovým klopným obvodem pro měření pulzů z anemometru je na obrázku 3.6, zapojení k měření počtu pulzů srážkoměru je identické, pouze je použit druhý kanál Schmittova klopného obvodu.

Zapojení čítače je na obrázku 3.7. Čítač je společně s obvodem na obrázku 3.6 nepřetržitě napájen, což je nezbytné pro správnou funkci.

Výstup Schmittova klopného obvodu je již přiveden na vstup čítače. Jelikož použitý čítač vyžaduje vyšší množství pinů, než které jsou k dispozici na mikrokontroléru, bylo třeba provést snížit množství nezbytných pinů. Vhodnou volbou je použití PISO (Parallel-in, serial-out) posuvného registru, který umožní převést více paralelních výstupů čítače na jediný sériový výstup z posuvného registru. Zvolený posuvný

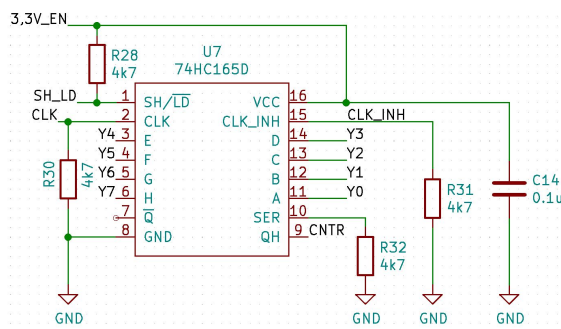


Obr. 3.6: Vyhlažovací obvod se Schmittovým KO.



Obr. 3.7: Zapojení čítače.

registr SN74HC165D firmy Texas Instruments [26] vyžaduje k obsluze minimálně 2 vstupní piny, což při převedení 8 paralelních vstupů na 1 sériový výstup znamená úsporu 5 pinů. Zapojení posuvného registru se nachází na obrázku 3.8.



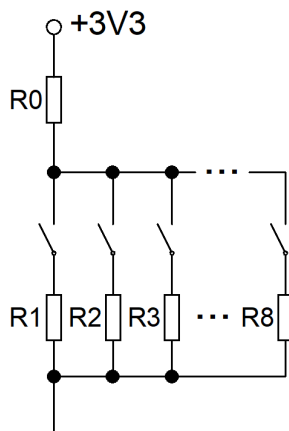
Obr. 3.8: Zapojení posuvného registru.

Napájení posuvného registru je přivedeno pouze v případě nutnosti vyčítání dat, aby bylo dosaženo snížení spotřeby.

3.7 Měření směru větru

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.5.5, použitý snímač směru větru funguje na principu připojování rezistorů o různých hodnotách do obvodu. Pro změření směru větru

je vhodné do obvodu zapojit předřadný rezistor, čímž vznikne napěťový dělič, viz obrázek 3.9.



Obr. 3.9: Napěťový dělič.

Připojením pinu mikroprocesoru na napěťový dělič je následně možno zjistit aktuální natočení snímače, respektive směr větru.

Při následujícím výpočtu bude vycházeno z tabulky 2.4, uvedené v kapitole 2.5.5. Jako rezistor R_0 byl zvolen rezistor o velikosti $10\text{ k}\Omega$. Ze znalosti napájecího napětí vzniklého děliče $3,3\text{ V}$ a referenčního napětí A/D převodníku $3,3\text{ V}$ je možno vypočítat očekávanou hodnotu naměřenou A/D převodníkem při daném směru natočení snímače. Nejprve lze využít obecně známý vztah pro výpočet (nezatíženého) napěťového děliče

$$U_2 = \frac{R_1}{R_0 + R_1} \cdot U_1, \quad (3.1)$$

kde U_2 je napětí změřené A/D převodníkem a U_1 napájecí napětí. Pro dosazení bude použito natočení snímače pro směr S, tedy natočení 0° , tedy $R_1 = 33\text{ k}\Omega$:

$$U_2 = \frac{33 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 33 \cdot 10^3} \cdot 3,3, \quad (3.2)$$

tedy $U_2 \doteq 2,53\text{ V}$. Jak již bylo uvedeno, A/D převodník je 12 bitový. Pro výpočet očekávané hodnoty A/D převodníku je při znalosti napětí možno využít vztah

$$AD = \frac{U_2 \cdot (2^n - 1)}{U_1}, \quad (3.3)$$

kde AD je očekávaná hodnota A/D převodníku a n je počet bitů A/D převodníku. Pro konkrétní směr větru tedy bude hodnota A/D převodníku v ideálním případě $AD \doteq 3143$. Tento výpočet uvažuje přesné rezistory s nulovou odchylkou a ideální podmínky měření. Pro spolehlivou funkci je nutno v softwaru vytvořit pole

pro minimální a maximální hodnoty A/D převodníku pro každé z možných natočení a následně dle naměřené hodnoty spadající do určitého rozsahu určit natočení snímače.

3.8 Měření vlhkosti půdy

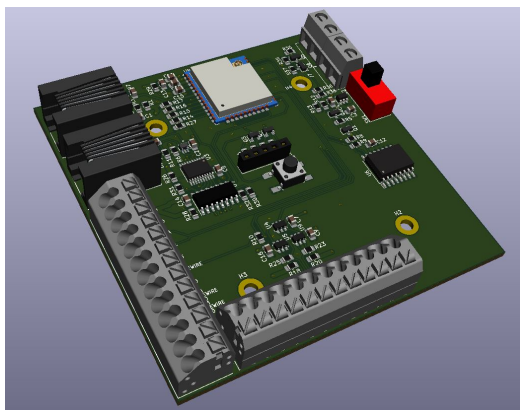
Jak bylo uvedeno v podkapitole 2.5, snímač vlhkosti půdy HW-390 převádí vlhkost půdy na výstupní napětí. Jelikož bude centrální jednotka s ESP32 umístěna ve výšce přibližně 1 m nad zemí, bylo rozhodnuto o použití mikroprocesoru v bezprostřední blízkosti senzoru za účelem převedení výstupního napětí senzoru do digitální podoby pro zajištění co nejvyšší přesnosti měření a minimalizaci vlivu rušení. K tomuto účelu byl zvolen mikroprocesor Attiny85 firmy Microchip [27], jelikož se jedná o mikroprocesor v kompaktním pouzdře vhodném pro umístění v blízkosti senzoru. Integrovaný A/D převodník má rozlišení 10 bitů, tedy rozsah 0–1023. Výstupní napětí senzoru v závislosti na vlhkosti se mění v rozsahu přibližně 1–2,6 V, což při referenčním napětí A/D převodníku 3,3 V odpovídá 48,5 % rozsahu, tedy 496 různým hodnotám. V ideálním případě je možno dosáhnout rozlišení $\approx 0,2$ % vlhkosti.

Pro komunikaci s ESP32 byl zvolen protokol UART (Universal asynchronous receiver-transmitter). Tento protokol standardně nepodporuje master-slave komunikaci, která je nezbytná pro komunikaci se třemi zařízeními typu slave. Použitím logického hradla typu AND je možno navzájem izolovat TX piny slave zařízení (Attiny85) a vytvořit tak jednoduchou sběrnici podporující master-slave komunikaci založené na protokolu UART. Za tímto účelem bylo vybrán integrovaný obvod 74LVC1G11GV.125 firmy Nexperia [28]. Pro zvýšení spolehlivosti přenosu jsou všechny slave i master zařízení vybaveny bufferem. K tomuto účelu byl zvolen buffer 74LVC2G17W6-7 firmy Diodes Incorporated [29]. Tento integrovaný obvod obsahuje dva kanály, což je velmi výhodné pro použití na RX i TX. Oba kanály jsou navíc vybaveny Schmittovým klopným obvodem.

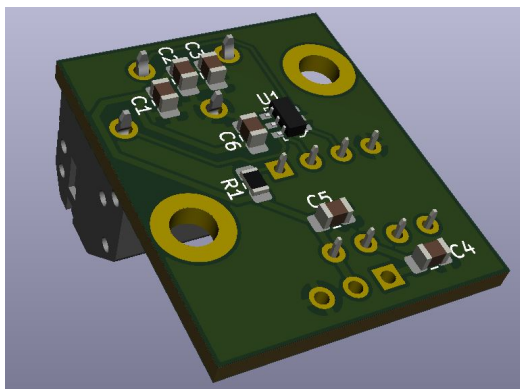
3.9 DPS

Pro návrh DPS byl využit program KiCad ve verzi 5.1.7. Jedná se o opensource software, jeho výhodou je přívětivé uživatelské rozhraní a samozřejmě především použití zdarma. KiCad navíc umožňuje přiřadit každému pouzdru součástky 3D model. Následně je možno výslednou DPS exportovat ve formě 3D modelu. Navrženy a vyrobeny byly dvě různé DPS, jedna s mikrokontrolérem ESP32 sloužící jako centrální jednotka a druhá s Attiny85 sloužící pro převod analogové výstupní veličiny ze senzoru vlhkosti do digitální podoby pro komunikaci s ESP32. Náhled centrální

DPS s ESP32 je vidět na obrázku 3.10 a náhled DPS s Attiny85 se nachází na obrázku 3.11.

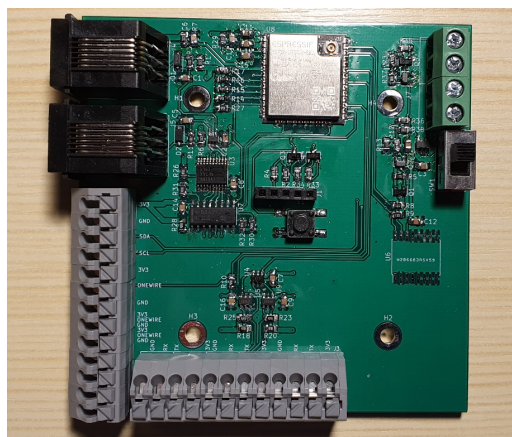


Obr. 3.10: Náhled navržené DPS s ESP32.



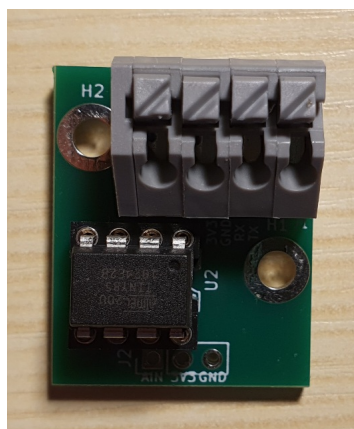
Obr. 3.11: Náhled navržené DPS s Attiny85.

DPS byly vyrobeny firmou PCBWay [30]. Finální osazená centrální DPS s ESP32 je na obrázku 3.12.

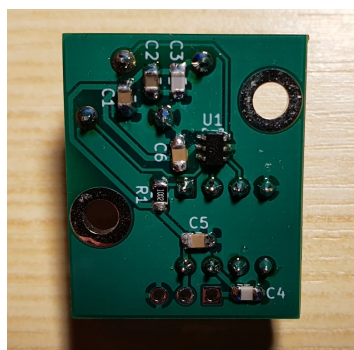


Obr. 3.12: Osazená DPS s ESP32.

Horní strana osazené DPS s Attiny85 je k vidění na obrázku 3.13, spodní strana se nachází na obrázku 3.14.



Obr. 3.13: Osazená DPS s Attiny85, horní strana.

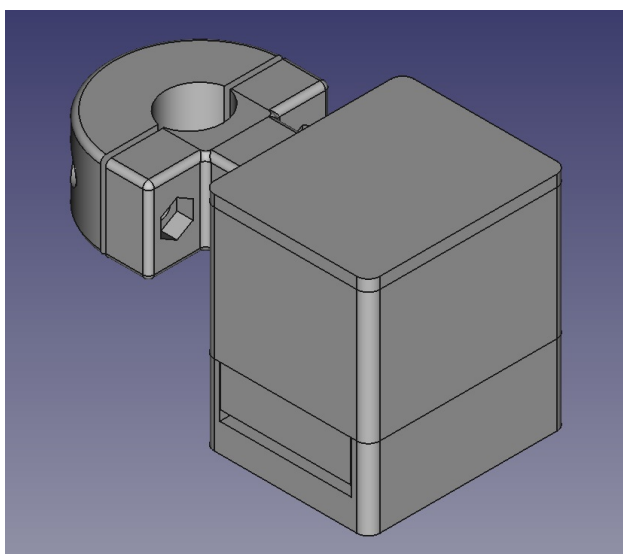


Obr. 3.14: Osazená DPS s Attiny85, spodní strana.

3.10 Ochranná krabička senzoru vlhkosti půdy

Senzor vlhkosti půdy má standardně volně přístupnou vyhodnocovací část s elektronikou, což je samozřejmě nevhodné pro venkovní použití z důvodu možného zkratu a tím zničení senzoru. Navíc bylo nutno umístit DPS s Attiny85 do blízkosti senzoru. Bylo rozhodnuto o navržení ochranné krabičky sloužící jednak k ochraně elektroniky senzoru a jednak k montáži DPS s Attiny85.

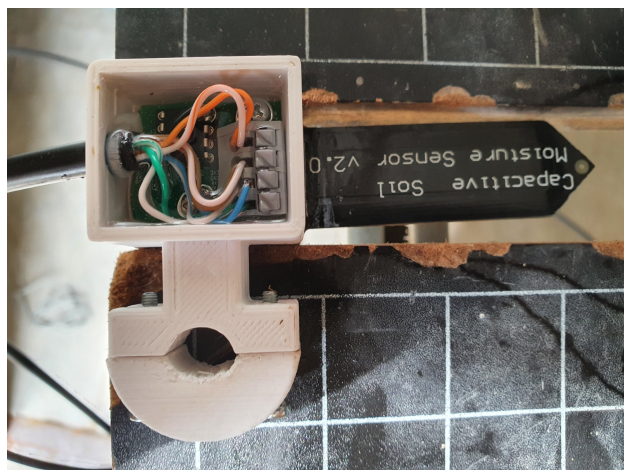
Krabička se skládá ze 2 částí a víka. Spodní část slouží pro umístění senzoru, horní část pro uchycení DPS. Tato část je navíc vybavena objímkou pro uchycení na tyč o průměru 9–12 mm. Krabička byla navržena v programu FreeCad ve verzi 0.18. Na obrázku 3.15 je zobrazen 3D model sestavené krabičky.



Obr. 3.15: Náhled navržené ochranné krabičky senzoru.

Krabičky byly následně vytištěny na 3D tiskárně z materiálu PET-G. Po osazení DPS a senzoru vlhkosti byly krabičky vylity konzervačním gelem Zalewa Silikonowa 031 od firmy AG Termopasty pro zakonzervování elektroniky a zamezení vniknutí vlhkosti a možného zničení. Jednotlivé díly krabičky byly slepeny vteřinovým lepidlem. Kompletní krabička se senzorem, DPS s Attiny85 a po vylití gelem je na obrázku 3.16.

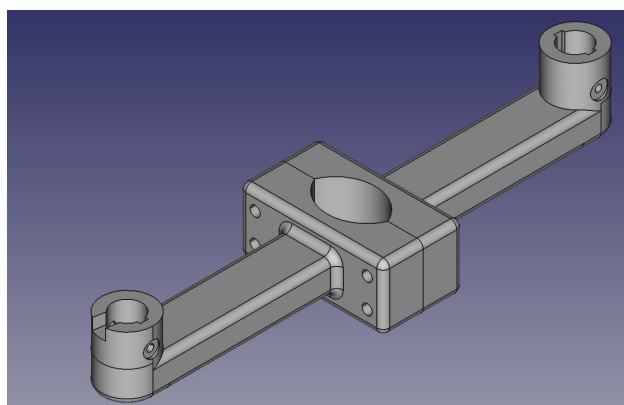
K připojení senzoru k centrální jednotce byl zvolen FTP kabel určený pro venkovní použití s UV stabilním pláštěm, jelikož z dostupných kabelů vyhovoval nejvíce při požadavku na alespoň 4 žíly.



Obr. 3.16: Ochranná krabička senzoru vlhkosti po osazení a vylití.

3.11 Držák anemometru a směrovky

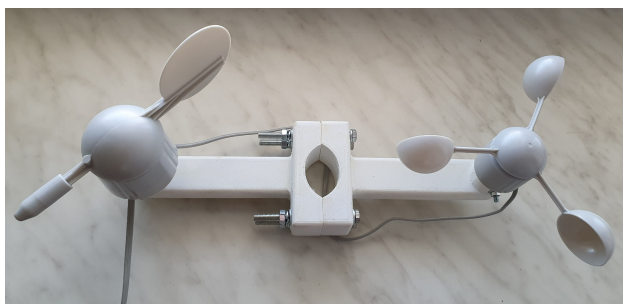
Pro uchycení anemometru a směrovky byly navrženy držáky opět pro vytištění na 3D tiskárně. Délka každého z držáků včetně objímky je 163 mm. Objímka je určena pro uchycení na trubku o průměru 30–50 mm pomocí 4 šroubů M6x80. Sestavu navržených držáků je možno vidět na obrázku 3.17.



Obr. 3.17: Náhled sestavy držáků směrovky a anemometru.

Držáky jsou opatřeny drážkou pro uchycení kabelů vedoucích ze senzorů. Tyto kabely je možno uchytit pomocí běžných stahovacích pásků. K uchycení snímačů do držáků byly vymodelovány otvory pro šroub M4x40 pro každý ze senzorů.

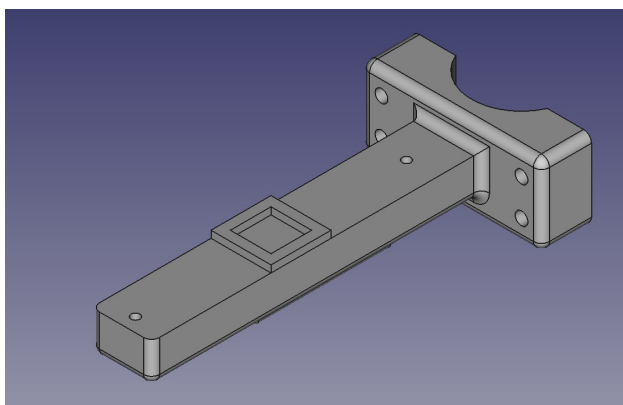
Oba díly byly vytištěny na 3D tiskárně z materiálu PET-G. Výsledné držáky včetně osazených senzorů jsou na obrázku 3.18.



Obr. 3.18: Držák anemometru a směrovky.

3.12 Držák srážkoměru

K uchycení srážkoměru byl navržen držák s objímkou rovněž na trubku o průměru 30–50 mm. Součástí držáku je opět drážka pro uchycení kabelu vedoucího ze senzoru pomocí stahovacích pásek. Navržený držák je na obrázku 3.19.



Obr. 3.19: Náhled držáku srážkoměru.

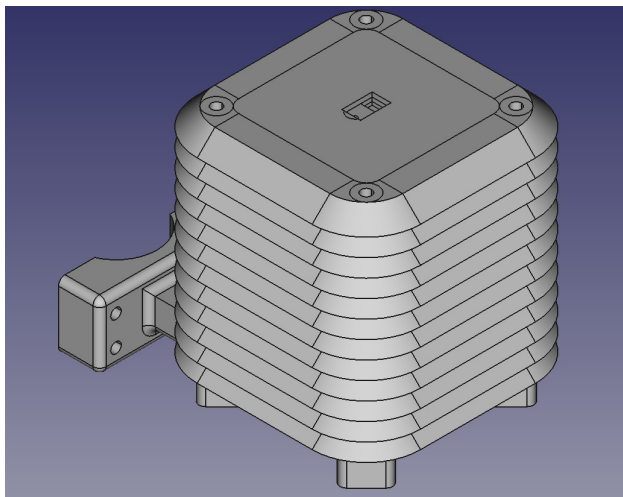
Výsledný držák po vytištění na 3D tiskárně je na obrázku 3.20. K přichycení srážkoměru k držáku jsou použity dva šrouby M4x40.



Obr. 3.20: Držák srážkoměru.

3.13 Radiační štít

Pro účely ochrání čidla teploty, tlaku a vlhkosti před UV zářením bylo nutno navrhnout radiační štít. Návrh vycházel z poznatků uvedených v bakalářské práci Bc. Adama Janáčka [31]. Navržený štít se skládá ze 3 plných spodních plátů, 6 otevřených plátů a 3 plných vrchních plátů. Spodní i vrchní pláty mají otvory na kabel o průměru do 6,2 mm. Rozměry jednotlivých plátů jsou 138x138x10,8 mm. Návrh sestaveného radiačního štítu je na obrázku 3.21. K uchycení modulu s BME280 ob-



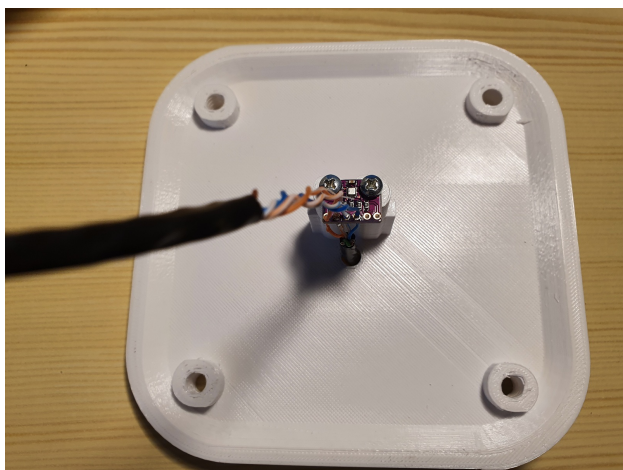
Obr. 3.21: Náhled radiačního štítu.

sahuje nejspodnější vrchní plát plošky o délce 33,7 mm, aby bylo zajištěno umístění senzoru uprostřed komůrky radiačního štítu. Ve vrchním plátu radiačního štítu bylo vymodelováno místo pro DPS s UV senzorem VEML6075. Součástí návrhu je rovněž držák s objímkou pro uchycení radiačního štítu na trubku a mezikus v podobě kříže určený k přichycení plátů na samotný držák. Tento kříž byl navržen jako samostatný díl z důvodu snadnějšího tisku a snížení množství podpor.

Jednotlivé pláty a držák byly vytištěny rovněž na 3D tiskárně. Modul s BME280 byl přišroubován k ploškám vrchního plátu určeného k uchycení modulu, viz obrázek 3.22. Pro lepší fixaci byl modul k ploškám ještě přilepen vteřinovým lepidlem. Kontakty modulu byly následně ošetřeny izolačním lakem Urethan 71.

K sestavení kompletního radiačního štítu byly použity závitové tyče M6, pomocí nichž byly jednotlivé pláty rovněž spojeny s křížem. Ke spojení držáku s křížem s pláty byly využity dva šrouby M6x40. Sestavený radiační štít je na obrázku 3.23.

DPS s UV senzorem VEML6075 byla uchycena do vrchního plátu radiačního štítu do místa pro UV senzor vrutem 2,9x6,5 mm. Následně byla DPS s UV senzorem zalita konzervačním gelem stejně jako ochranná krabička senzoru vlhkosti. Pro



Obr. 3.22: Uchycení modulu s BME280 v radiačním štítu.



Obr. 3.23: Radiační štít.

lepší ochranu byl povrch gelu ještě opatřen 5 vrstvami ochranného izolačního laku Urethan 71.

3.14 Držák solárního panelu

K uchycení solárního panelu byl vymodelován držák ve tvaru písmene U. Z důvodu velikosti jednotlivých dílů se tento držák skládá ze dvou samostatně tisknutelných částí, které se následně spojí pomocí dvou šroubů M6x45. Držák rovněž obsahuje drážku pro uchycení kabelu.

Po vytištění na 3D tiskárně byl solární panel k držáku přichycen pomocí dvou šroubů M5x30 a čtvercových matic, které byly vhodné pro umístění do profilu so-

lárního panelu. Ze solárního panelu byl vyveden dvoužilový kabel o průřezu vodičů $0,75 \text{ mm}^2$. Vytištěný držák se solárním panelem se nachází na obrázku 3.24.

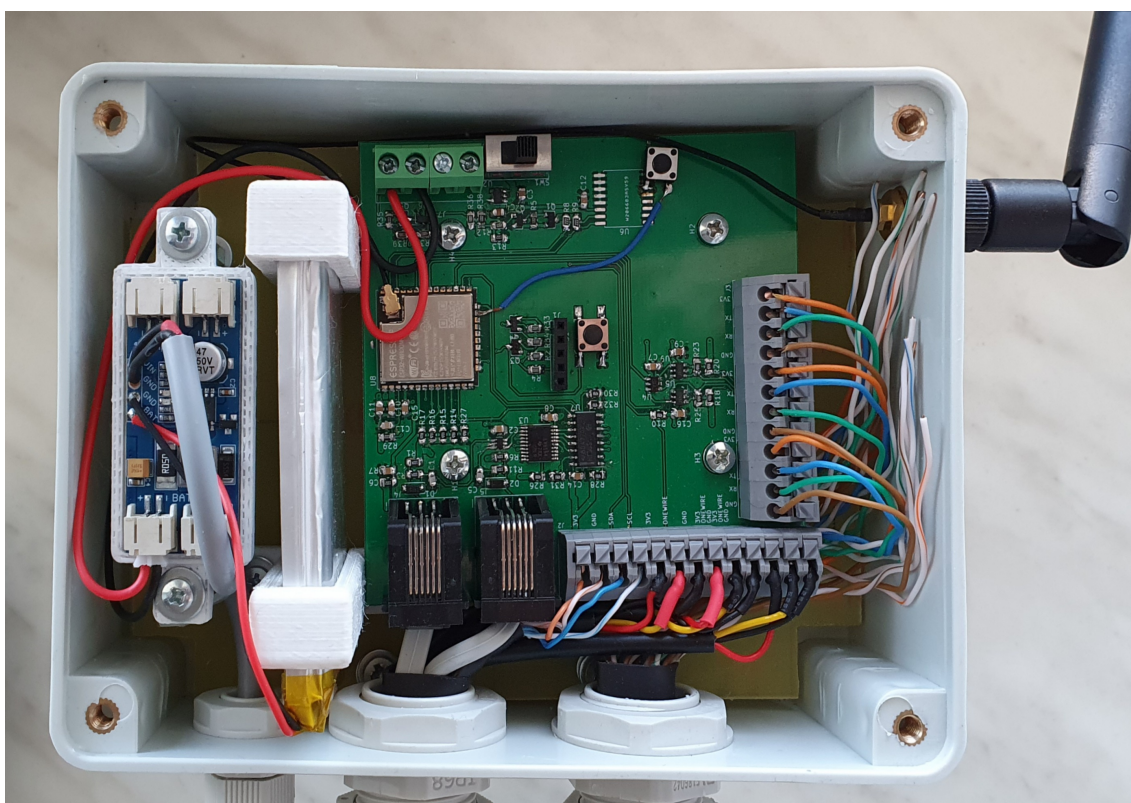


Obr. 3.24: Držák solárního panelu.

3.15 Centrální jednotka

Pro osazení centrální jednotky byla zvolena instalační krabice s krytím IP65. Pro uchycení baterie a kontroléru nabíjení ze solárního panelu do krabice bylo nutno vymodelovat jednoduché držáky a následně vytisknout na 3D tiskárně. Jako mezikus pro uchycení držáků baterie, kontroléru nabíjení a samotné DPS centrální jednotky byla zvolena cuprexitová deska z důvodu vysoké pevnosti a nízké tloušťky. Pro uchycení krabice na trubku byla použita stejná objímka jako na ostatních držácích, tedy určená pro uchycení na 30–50 mm trubku, pouze byla zesílena její stěna o 5 mm a následně vytištěna na 3D tiskárně. Přichycena ke krabici je pomocí čtyř šroubů M6x100, které zároveň slouží i pro stažení objímky na trubku.

Z důvodu velkého počtu kabelů vedoucích do centrální jednotky bylo rozhodnuto o protažení více kabelů jednou průchodkou. Krabice byla tedy osazena třemi průchodkami s pancéřovým závitem a to v konfiguraci 2x PG16 a 1x PG7. Tato konfigurace umožnila protáhnout průchodkou PG7 samotný kabel solárního panelu, jednou průchodkou PG16 tři FTP kabely ze senzorů vlhkosti a druhou průchodkou PG16 veškeré ostatní kabely. Svazek kabelů byl v místě průchodu průchodkou opatřen smršťovací bužírkou o průměru 12 mm se smršťovacím poměrem 4:1 s lepidlem pro lepší zatěsnění průchodu. Krabice byla ze strany opatřena otvorem pro externí anténu. Následně byla použita anténa se ziskem 6 dBi. DPS s centrální jednotkou byla osazena na distanční sloupky o výšce 6 mm. Finální osazená krabice je na obrázku 3.25.



Obr. 3.25: Zkompletovaná krabička.

4 Vývoj softwarové části zařízení

Tato kapitola se věnuje softwarové části zařízení. Nejprve jsou uvedeny možné režimy, v nichž může meteostanice pracovat, včetně webového rozhraní. Následně jsou rozebrány vybrané části kódu.

4.1 Webové rozhraní

V rámci webového rozhraní meteostanice je možno zobrazit aktuální naměřená data a to jednak v grafické podobě a jednak ve formátu JSON (JavaScript Object Notation). Kromě toho je možno prostřednictvím webového rozhraní provést konfiguraci meteostanice.

4.1.1 Pracovní režimy meteostanice

Meteostanice umožňuje pracovat ve dvou režimech. Jedním je režim hotspot, kdy je po připojení k WiFi možno zobrazit naměřená data a konfigurovat meteostanici. Druhým režimem je režim periodického probouzení z režimu spánku, kdy jsou naměřená data zasílána buďto na Thingspeak, nebo na vlastní server.

4.1.2 Výchozí webová stránka

Tato stránka byla vytvořena za použití jazyka HTML (Hypertext Markup Language), graficky vylepšena pomocí Cascading Style Sheets (Cascading Style Sheets) využívá ke své činnosti Javascript. Na této stránce jsou k vidění aktuální naměřená data ze všech senzorů, viz obrázek 4.1. Aktualizace údajů probíhá v případě ponechání otevřené stránky v prohlížeči automaticky každých 5 minut prostřednictvím AJAX (Asynchronous JavaScript and XML). Z této stránky je možno dostat se do zobrazení surových dat v podobě JSON (JavaScript Object Notation) a dále na stránku Settings obsahující možnosti konfigurace.

4.1.3 Stránka s daty v podobě JSON

Stránka s daty ve formátu JSON slouží primárně k strojovému vyčítání aktuálních naměřených hodnot. Jelikož se jedná o čistý text, není zde použit ani AJAX a aktualizace naměřených údajů probíhá s každým obnovením stránky. Výsledný formát je ve výpisu 4.1.

Meteostanice

Poslední aktualizace: 15:44:50

Velicina	Hodnota
Teplota	23.47 °C
Vlhkost	51.33 %
Tlak	971.98 hPa
Rychlost vetru	4.57 km/h
Smer vetru	W
Mnozstvi srazek	0.56 mm/5 min
UV index	0.01
Teplota pudy v 0 cm	23.88 °C
Teplota pudy v 0 cm	23.88 °C
Teplota pudy v 0 cm	23.88 °C
Vlhkost pudy v 0 cm	5.36 %
Vlhkost pudy v 0 cm	5.37 %
Vlhkost pudy v 0 cm	5.14 %
Napeti baterie	3.90 V
JSON	Settings

Obr. 4.1: Výchozí webová stránka.

Výpis 4.1: Naměřená data ve formátu JSON

```
1 {"teplota:" 23.55, "vlhkost:" 51.42, "tlak:" 972.00,
2  "rychlost_vetru:" 4.29, "smer_vetru:" 270.00,
3  "mnozstvi_srazek:" 0.28, "uv_index:" 4.8,
4  "teplota_pudy_0cm:" 23.94, "teplota_pudy_25cm:" 23.74,
5  "teplota_pudy_50cm:" 23.65, "vlhkost_pudy_5cm:" 5.34,
6  "vlhkost_pudy_25cm:" 5.37, "vlhkost_pudy_50cm:" 5.14,
7  "napeti_baterie:" 3.89}
```

4.1.4 Konfigurační stránka

K možnosti konfigurace byla vytvořena konfigurační stránka, která je navíc chráněna pomocí HTTP (Hypertext Transfer Protocol) Basic auth s výchozími přístupovými údaji jméno admin a heslo esp32. Na stránce je možno nakonfigurovat přístupové údaje k HTTP Basic auth, dále zvolit režim provozu, tedy jestli se má zařízení periodicky připojovat k WiFi síti v režimu klient, nebo být stále spuštěné v režimu

server.

V režimu klient je možno nastavit například údaje k připojení k existující WiFi síti, zvolit, kam se mají zasílat data, například na Thingspeak, nebo vybrat interval zasílání dat v rozsahu 1–15 minut. V případě Thingspeaku je rovněž nutno zadat tzv. Channel ID a API klíč ke dvěma kanálům. Konfigurační stránka je na obrázku 4.2.

Meteostanice
16:12:00 12.05.2021

Zabezpečení stránky
Jmeno
4-32 znaku
Heslo
8-32 znaku

Volba režimu
Klient

Údaje k připojení
SSID
4-32 znaku
Password
8-32 znaku

Zasílání dat
Thingspeak

Interval zasílání dat
5 minut

Thingspeak Channel ID
3-10 cistic
Thingspeak API key
16 znaku
Thingspeak Channel ID2
3-10 cistic
Thingspeak API key 2
16 znaku

Ulož

Seznam dostupných sítí
HIDDEN_SSID Sila signalu: -54 dBm 🔒
S100 Sila signalu: -64 dBm 🔒

Obr. 4.2: Konfigurační stránka.

V případě zvolení režimu server lze zadat údaje k vytvoření přístupového bodu a dále zadat hloubky umístění půdních senzorů, které se následně zobrazí jednak ve výchozí stránce a jednak i na stránce s daty ve formátu JSON. Součástí konfigu-

rační stránky je ve všech případech zobrazení okolních WiFi sítí včetně síly signálu a to jak skrytých, tak i zabezpečených. Aktualizace okolních WiFi sítí probíhá každých 15 sekund opět prostřednictvím AJAX.

4.1.5 Funkce pro obsluhu požadavků webového rozhraní

K obsluze požadavků webového rozhraní slouží následující funkce. Funkce `handleIndex()`, `handleSettings()` a `handleJson()` slouží k obsluze požadavků na přístup k výchozí stránce, respektive konfigurační stránce a stránce s daty ve formátu JSON. První dvě funkce využívají souborový systém, tzv. SPIFFS (SPI Flash File System). Výchozí stránka `index.html`, respektive konfigurační stránka `settings.html` jsou, podobně jako soubor s Javascriptem a kaskádovými styly, uloženy v souborovém systému. Při požadavku na načtení stránky je tento soubor načten a odeslán, viz výpis 4.2.

Výpis 4.2: Obsluha požadavku na výchozí stránku.

```
1 void handleIndex() {  
2     File htmlFile = SPIFFS.open("/index.html", "r");  
3     server.streamFile(htmlFile, "text/html");  
4     htmlFile.close();  
5 }
```

Funkce `handleSettings()` a funkce, které jsou volány při požadavku na načtení souboru s Javascriptem, respektive kaskádovými styly, tedy `handleJavascript()` a `handleCss()` mají stejnou strukturu, liší se jen názvem souboru. Funkce `handleJson()` nevyužívá souborový systém, místo toho se zde využívá pole znaků, které je naplněno řetězci znaků ve formátu JSON spolu s aktuálními daty.

Jak bylo uvedeno v kapitolách 4.1.2 a 4.1.4, k aktualizaci dat, respektive seznamu okolních WiFi sítí se využívá AJAX. K obsluze těchto požadavků slouží funkce `sendXMLData()` a `sendXMLWifi()`. V případě funkce `sendXMLData()` se jedná o naplnění pole znaků ve formátu XML s aktuálními daty a jejich odeslání. U funkce `sendXMLWifi()` se využívá asynchronní skenování okolních WiFi sítí z důvodu relativně dlouhého skenování. První část funkce `sendXMLWifi()` je na výpisu 4.3.

Výpis 4.3: Aktualizace seznamu WiFi sítí, část 1.

```

1 char charBuffer[400] = "\0";
2 char xmlBuffer[450];
3 char RSSIbuffer[10];
4 int n = WiFi.scanComplete();
5 if (n == -2) {
6     WiFi.scanNetworks(true, true);
7     strcpy(xmlBuffer,
8     "<?xml version='1.0'><inputs>");
9     strcat(xmlBuffer, "<reading>");
10    strcat(xmlBuffer, "Scanning");
11    strcat(xmlBuffer, "</reading>\n");
12    strcat(xmlBuffer, "</inputs>");
13    server.send(200, "text/xml", xmlBuffer);
14 }
```

Nejprve je zavolána funkce `WiFi.scanComplete()`, která vrací hodnotu -2, pokud ještě nebylo provedeno skenování (například po spuštění). Při dotazu prohlížeče je tedy odesláno pouhé „Scanning“ a je zahájeno asynchronní skenování. Pokud by došlo k dalšímu dotazu prohlížeče dříve, než je skenování dokončeno, funkce `WiFi.scanComplete()` vrátí hodnotu -1. V tomto případě není znovu zahájeno skenování, zašle se pouze XML Extensible Markup Language řetězec ve formátu podobném jako na výpisu 4.3. Další část funkce je na výpisu 4.4. Jakmile se prohlížeč dotáže znovu na aktualizaci, je postupně naplněno pole *charBuffer* okolními sítěmi a to ve formátu název, síla signálu a případně ještě znakem zámku v případě, že se jedná o zabezpečenou WiFi síť. Pokud má síť skryté SSID, je místo názvu sítě vložen řetězec `*HIDDEN_SSID*`. Následně je naplněno pole *xmlBuffer* ve formátu požadovaném XML a vzniklý řetězec odeslán. Poté jsou smazány existující záznamy a znovu provedeno asynchronní skenování.

Výpis 4.4: Aktualizace seznamu WiFi sítí, část 2.

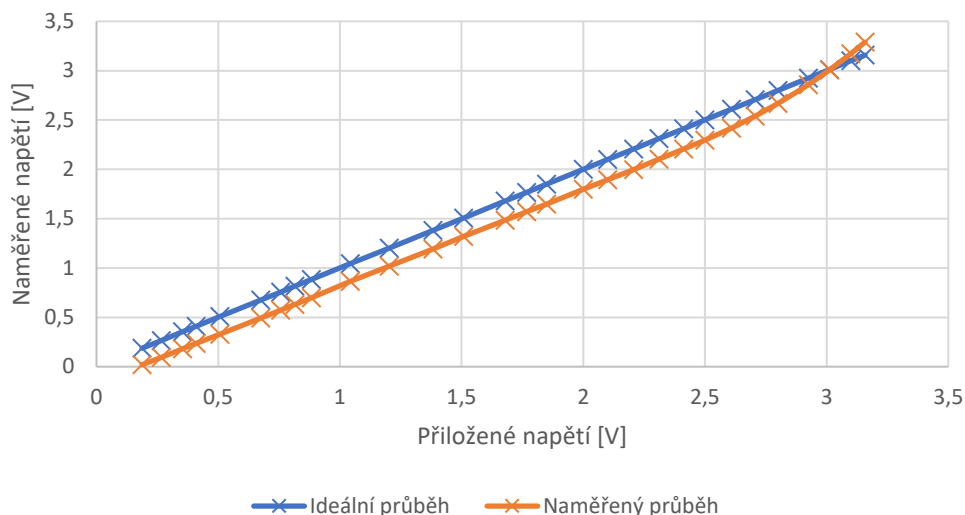
```

1  else if (n) {
2      for (int i = 0; i < n; i++)
3      {
4          if (WiFi.SSID(i) == "")
5          {
6              strcat(charBuffer, "*HIDDEN_SSID*");
7          }
8          else
9          {
10             strcat(charBuffer, WiFi.SSID(i).c_str());
11         }
12         strcat(charBuffer, "  Sila  signalu: ");
13         itoa(WiFi.RSSI(i), RSSIbuffer, 10);
14         strcat(charBuffer, RSSIbuffer);
15         if (WiFi.encryptionType(i) == WIFI_AUTH_OPEN)
16         {
17             strcat(charBuffer, "  dBm<br>");
18         }
19         else
20         {
21             strcat(charBuffer, "  dBm  &#x1F512;<br>");
22         }
23     }
24     strcpy(xmlBuffer,
25     "<?xml  version= \"1.0\"  ?><inputs>");
26     strcat(xmlBuffer, "<reading>");
27     strcat(xmlBuffer, charBuffer);
28     strcat(xmlBuffer, "</reading>\n");
29     strcat(xmlBuffer, "</inputs>");
30     server.send(200, "text/xml", xmlBuffer);
31     Serial.println("Sending XML wifi file");
32     WiFi.scanDelete();
33     if (WiFi.scanComplete() == -2)
34     {
35         WiFi.scanNetworks(true, true);
36     }
37 }

```

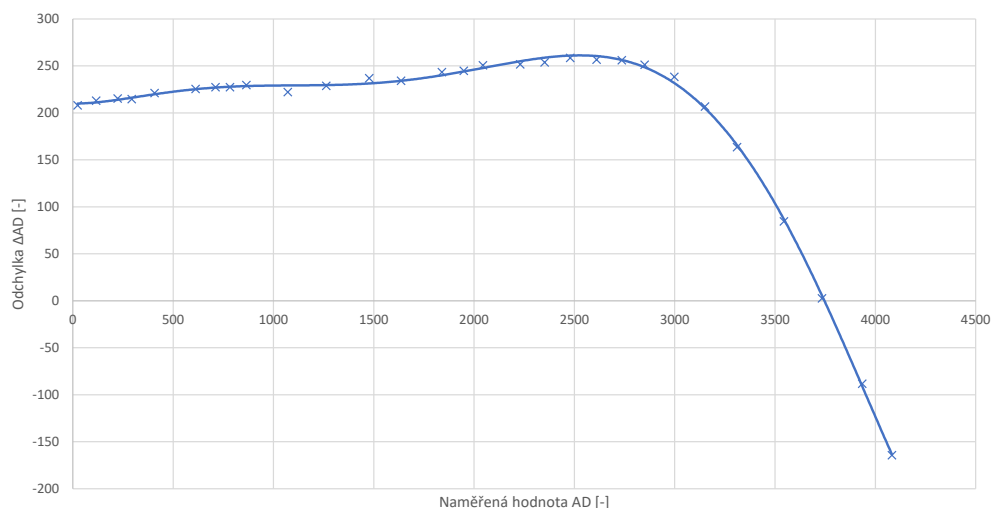
4.2 Kalibrace A/D převodníku

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.7, k určení směru větru je nutno využít A/D převodník. A/D převodník v ESP32 má nelineární charakteristiku průběhu, což značně komplikuje měření. Pro přesné měření je vhodné tento průběh linearizovat. Za tímto účelem bylo naměřeno napříč rozsahem A/D převodníku 29 hodnot napětí za současného měření voltmetrem. Srovnání průběhu A/D převodníku s ideálním průběhem je na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Srovnání průběhu A/D převodníku s ideálním průběhem.

Rozdíl obou průběhů byl vyneseno do grafu a proložen polynomem 6. stupně, viz obrázek 4.4. Na tomto obrázku jsou místo napětí přímo úrovně A/D převodníku, ale analogicky by zde bylo možno použít napětí.



Obr. 4.4: Závislost odchylky A/D převodníku na naměřené hodnotě.

Výsledná rovnice popisující tento polynom je použita k softwarové kompenzaci nelinearity převodníku a díky tomu je možno dosáhnout odchylky $\Delta_{\text{err}} \leq 10 \text{ mV}$, což je značné zlepšení oproti výchozímu stavu bez kompenzace, kde naměřená a skutečná hodnota dosahuje odchylky až 200 mV. Rovnice popisující tento polynom má tvar $y = 2,996 \cdot 10^{-18}x^6 - 3,339 \cdot 10^{-14}x^5 + 1,275 \cdot 10^{-10}x^4 - 2,049 \cdot 10^{-7}x^3 + 1,289 \cdot 10^{-4}x^2 - 2,002 \cdot 10^{-3}x + 209,97$. Na výpisu 4.5 je převedená rovnice do funkce. Tato funkce přijímá na svém vstupu proměnnou typu double, přičemž v této proměnné je uložena aktuální hodnota A/D převodníku. Funkce provede kompenzaci a vrátí kompenzovanou hodnotu A/D převodníku.

Výpis 4.5: Funkce na linearizaci A/D převodníku.

```

1 double linearize(double x) {
2     return 209.97
3     - 2.002e-03 * x
4     + 1.289e-04 * pow(x,2)
5     - 2.049e-07 * pow(x,3)
6     + 1.275e-10 * pow(x,4)
7     - 3.339e-14 * pow(x,5)
8     + 2.996e-18 * pow(x,6);
9 }
```

4.3 Kalibrace senzorů vlhkosti půdy

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.5, vybrané senzory vlhkosti půdy převádí vlhkost půdy na analogovou výstupní veličinu v podobě napětí. K těmto senzorům nicméně

neexistuje žádná dokumentace a tak bylo nutno tyto senzory zkalibrovat, aby bylo možno zjistit skutečnou vlhkost půdy.

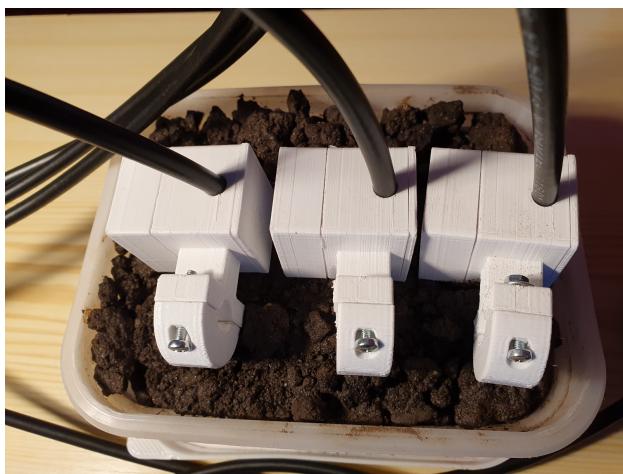
Proces kalibrace vycházel z publikace Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193) [32], kde byl velmi podrobně vysvětlen celý proces. Vlhkost půdy lze vypočítat dle vztahu [32]

$$Vlhkost_pudy(\%) = \frac{(b - a) - (c - a)}{c - a} \cdot 100, \quad (4.1)$$

kde a je hmotnost prázdné krabičky, b hmotnost krabičky s vlhkou půdou, c hmotnost krabičky a suché půdy po vysušení.

Pro kalibraci je nutno nejprve důkladně zbavit hlínu vlhkosti a to sušením v troubě při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin. Nejprve bylo rozhodnuto pro účely kalibrace použít zahradnický substrát. Substrát se ukázal být jako nevhodný, jelikož při sušení na teplotu 105 °C po několika hodinách došlo k rozžhavení úlomků kůry v substrátu a následně ke zpopelnění a tím znehodnocení směsi. Po neúspěchu se zahradnickým substrátem bylo rozhodnuto použít hlínu přímo z místa instalace meteostanice. Výstup senzoru se mírně liší v závislosti na složení hlíny i při konstantní vlhkosti [32], tudíž se jevílo použití hlíny z oblasti zamýšleného použití meteostanice jako nejvhodnější.

Po vysušení byla hlína navrstvena do krabičky pro účely kalibrace a následně celek zvážen, aby byla zjištěna hmotnost suché hlíny. Následně po dobu 48 hodin probíhalo postupné zalívání hlíny až do maximální saturace. Poté již započal samotný proces kalibrace senzorů spočívající ve vážení hlíny a odečítání naměřených hodnot ze senzorů jednou za den. Krabička s hlínou a senzory během kalibrační fáze je na obrázku 4.5. Postupné snižování hmotnosti hlíny znamenalo snižující se

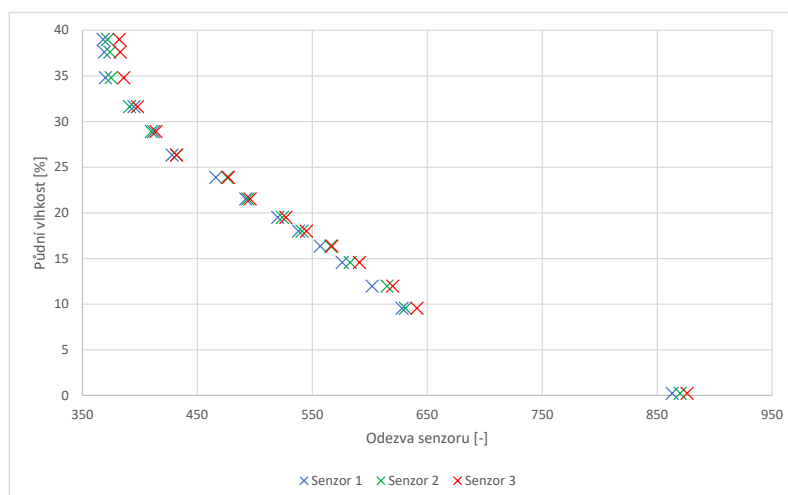


Obr. 4.5: Kalibrace senzorů.

podíl vody v hlíně a tím klesající vlhkost. Celý proces probíhal po dobu 17 dnů,

přičemž se snižující se vlhkostí půdy se zpomalovala rychlost odpařování, tudíž po 12 dnech každodenního měření následovalo další měření až 14. den a následně 17. den. Z původní vlhkosti půdy 38,99 % při nasycení bylo dosaženo finální vlhkosti 9,54 %, přičemž vlhkost klesala již jen velmi pozvolně.

Po dokončení měření byla provedena analýza naměřených dat, naměřená závislost odezvy senzorů na vlhkosti hlíny je na grafu 4.6. Z grafu je patrná nelineární závislost.



Obr. 4.6: Závislost odezvy senzorů na vlhkosti půdy.

Aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti, byla provedena regresní analýza a za pomoci MS Excel vypočítány kalibrační rovnice pro každý senzor zvlášť. Rovnice jsou ve tvaru $y = A \cdot x^{-n}$, kde y je vlhkost půdy, A je první koeficient, x odezva senzoru a n druhý koeficient. V tabulce 4.1 jsou uvedeny jednotlivé kalibrační rovnice pro každý ze senzorů. Rovněž je zde i uveden koeficient determinace R^2 , který se ve všech případech pohybuje nad 0,96, což značí dobrou predikci skutečné půdní vlhkosti.

Tab. 4.1: Kalibrační rovnice senzorů.

Senzor	Kalibrační rovnice	R^2
1	$1,72e + 07x^{2,205732229}$	0,968
2	$1,61e + 07x^{2,19157717}$	0,964
3	$3,307e + 07x^{2,29062659}$	0,966

V softwaru zařízení je implementována funkce, viz výpis 4.6 kde jsou využity tyto kalibrační rovnice. Vstupními parametry funkce je proměnná *adc*, která představuje výstupní napětí senzoru převedené do digitální podoby A/D převodníkem v Attiny85 a dále proměnná *senzor*, která značí číslo senzoru, na jejímž základě se

vyhodnocuje, kterou kalibrační rovnici použít. Po vyhodnocení se použije vybraná kalibrační rovnice, proměnná *moisture* je naplněna očekávanou hodnotou půdní vlhkosti a tato hodnota je následně navracena.

Výpis 4.6: Funkce na zjištění půdní vlhkosti.

```
1  float calculateSoilMoisture(uint16_t adc, uint8_t senzor){
2      float moisture;
3      switch (senzor) {
4          case 1:
5              {
6                  float a = 1.72e+07;
7                  float b = 2.205732229;
8                  double value = pow(adc, -b);
9                  moisture = (double)(a * value);
10                 break;
11             }
12         case 2:
13             {
14                 float a = 1.61e+07;
15                 float b = 2.19157717;
16                 double value = pow(adc, -b);
17                 moisture = (double)(a * value);
18                 break;
19             }
20         case 3:
21             {
22                 float a = 3.03e+07;
23                 float b = 2.29062659;
24                 double value = pow(adc, -b);
25                 moisture = (double)(a * value);
26                 break;
27             }
28         default:
29             moisture = 999;
30             break;
31     }
32     return moisture;
33 }
```


4.4 Ukládání a načítání konfigurace

Tato kapitola se věnuje ukládání a načítání konfigurace. Tyto činnosti jsou nezbytné, jelikož při přechodu do režimu spánku dojde ke ztrátě obsahu paměti RAM (Random Access Memory) a tím i ke ztrátě konfigurace. Řešením je uložení konfigurace do dlouhodobé paměti a načtení konfigurace po probuzení z režimu spánku.

4.4.1 Ukládání konfigurace

Podobně jako v případě souborů pro obsluhu webového serveru, tedy HTML, Javascript a CSS souborů, je k účelu uložení konfigurace využít souborový systém SPIFFS. Prakticky se jedná o zapisování proměnných do textových souborů. Nejdříve je v závislosti na zvoleném režimu, tedy jestli se jedná o režim klient nebo server, zapsána hodnota 1 nebo 2 do souboru mode.txt. Pokud byl zvolen režim klient, do souboru s názvem sendMode.txt je uložena hodnota 1 v případě, že byl zvolen pro zasílání dat Thingspeak, respektive 2 v případě vlastního serveru. Pokud byl zvolen Thingspeak, jsou do souboru thingspeak.txt řádek po řádku uloženy proměnné obsahující konfiguraci. V opačném případě se jedná o soubor ownServer.txt. V případě, že by byl zvolen režim server, tedy kontinuální režim bez zasílání dat, bude existovat pouze soubor mode.txt obsahující hodnotu 2 a soubor serverMode.txt, do kterého bude uložena konfigurace. Část funkce saveConfig() pro uložení konfigurace do souboru thingspeak.txt je na výpisu 4.7.

Výpis 4.7: Část funkce na ukládání konfigurace do souboru thingspeak.txt

```
1 File writeData = SPIFFS.open("/thingspeak.txt",
2 FILE_WRITE);
3 if (writeData) {
4     writeData.println(www_username);
5     writeData.println(www_password);
6     writeData.println(ssid_in);
7     writeData.println(password_in);
8     writeData.println(sleepTime);
9     writeData.println(APIkey);
10    writeData.println(channelID);
11    writeData.println(APIkey2);
12    writeData.println(channelID2);
13 }
14 writeData.close();
```

4.4.2 Načítání konfigurace

Při načítání konfigurace se postupuje opět postupně od souboru mode.txt a v závislosti na načtené hodnotě se rozhoduje, zda-li se bude následně vyčítat ze souboru sendMode.txt, nebo serverMode.txt. V případě souboru sendMode.txt pak dojde v závislosti na načtené hodnotě na vyčítání konfigurace ze souboru thingspeak.txt, nebo ownServer.txt. Část kódu pro načtení konfigurace ze souboru thingspeak.txt je na výpisu 4.8.

Výpis 4.8: Část funkce na načítání konfigurace ze souboru thingspeak.txt

```
1 File readData = SPIFFS.open("/thingspeak.txt", FILE_READ);
2 if (readData) {
3     reader = readData.readStringUntil('\n');
4     reader.replace("\r", "");
5     strcpy(www_username, reader.c_str());
6     reader = readData.readStringUntil('\n');
7     reader.replace("\r", "");
8     strcpy(www_password, reader.c_str());
9     //Pokracovani kodu
10 }
11 readData.close();
```

4.5 Vyčítání dat ze senzorů půdní vlhkosti

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.8, k zjištění vlhkosti půdy je použito kombinace Attiny85 pro každý senzor, tedy celkem 3x Attiny85. Vytvořena byla jednoduchá sběrnice, která funguje na principu dotaz–odpověď. Princip funkce je následující. Každé Attiny85 má přidělenou vlastní jedinečnou adresu. Centrální jednotka s ESP32 vyšle požadavek obsahující znak „#“ a následně adresu zařízení. Pokud jedno ze zařízení rozpozná tuto adresu, provede převod výstupního napětí senzoru do digitální podoby pomocí A/D převodníku a následně zašle opět znak „#“ následovaný vlastní adresou a poté naměřenou hodnotu A/D a to nejprve vyšších 8 bitů následovaných nižšími 8 bity. Jelikož má Attiny85 10 bitový A/D převodník, nebylo by příliš vhodné zbytečně snižovat přesnost a zasílat jen 8 bitů. První část kódu pro Attiny85 je na výpisu 4.9.

Výpis 4.9: Zaslání dat z Attiny 85, část 1.

```

1  if (softSerial.available() > 0) {
2      delay(10);
3      while (softSerial.available() > 0) {
4          incoming = softSerial.read();
5          receivedData[r] = incoming;
6          r++;
7          received = true;
8      }
9      r = 0;
10 }

```

V této funkci se kontroluje, zda-li jsou k dispozici nějaká data, pokud ano, je provedeno vyčtení a přijatá data jsou uložena do pole char *receivedData*[8]. Následně v případě, že byla přijata nějaká data se provede samotná kontrola, zda-li se jedná o adresu daného zařízení a v případě že ano, je provedeno samotné měření, viz výpis 4.10.

Výpis 4.10: Zaslání dat z Attiny 85, část 2.

```

1  if (received == true) {
2      received = false;
3      start_symbol_in = receivedData[0];
4      address_in = receivedData[1];
5      if (start_symbol_in == '#') {
6          if (address_in == 3) {
7              for (int i = 0; i < 6; i++) {
8                  intArray[i] = analogRead(Ad_in);
9                  delay(2);
10             }
11             sort(intArray, n);
12             int value = round(Find_median(intArray, n));
13             lowerByte = value & 0xFF;
14             upperByte = value >> 8;
15             softSerial.print(start_symbol);
16             softSerial.print(address);
17             softSerial.print(upperByte);
18             softSerial.print(lowerByte);
19         }
20     }
21 }

```

Pro zajištění přesnějšího výsledku a snížení možnosti například nahodilého rušení

je A/D převod proveden celkem 6x s časovými rozestupy mezi jednotlivými měřeními 2 ms. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou ukládány do pole *intArray*. Následně jsou naměřené hodnoty seřazeny od nejmenší po největší a nalezen medián. Tato hodnota je následně rozdělena do nižších 8 bitů a vyšších 8 bitů a odeslána.

Kód pro vyčítání v centrální jednotce je poněkud složitější, slouží k němu funkce `getSoilMoisture(char address)`. Nejprve je pro přehlednost uveden seznam použitých proměnných, viz výpis 4.11.

Výpis 4.11: Proměnné pro vyčítání dat v centrální jednotce

```
1  float moisture;  
2  char start_symbol = '#';  
3  char incoming;  
4  bool received = false;  
5  bool success = false;  
6  int address_in;  
7  char start_symbol_in;  
8  char receivedData[8];  
9  byte n = 0;  
10 uint16_t adcvalue = 9999;  
11 uint8_t i = 0;
```

Celý proces vyčítání dat je zapouzdřen v cyklu `while`, ve kterém se kontroluje podmínka, zda-li došlo k úspěšnému přijetí dat od dotazovaného zařízení, nebo byl překročen počet pokusů, který byl stanoven na 3. První část kódu je na výpisu 4.12.

Výpis 4.12: Vyčítání dat v centrální jednotce, část 1.

```

1  while (i < 3 && !success){
2      n = 0;
3      while (softSerial.available() > 0){
4          softSerial.read();
5      }
6      softSerial.print(start_symbol);
7      softSerial.print(address);
8      delay(30 + 5 * i);
9      if (softSerial.available() > 0){
10         delay(5);
11         while (softSerial.available() > 0){
12             incoming = softSerial.read();
13             receivedData[n] = incoming;
14             n++;
15             received = true;
16         }
17     }

```

Nejprve je provedeno vyprázdnění bufferu pro případ, že by se zde nacházela nějaká původní data. Následně je zaslán znak „#“ a adresa zařízení, od kterého chce centrální jednotka získat data. Následně je vložena prodleva, která slouží k vyčkání, dokud nedojde k zaslání adresy, naměření A/D hodnoty v zařízení a následnému příjmu. Poté se kontroluje, zda-li byla přijata nějaká data a pokud ano, postupně jsou uložena po osmicích bitů do pole *receivedData*[] a přepínač *received* je nastaven na true.

Poté se již pracuje s přijatými daty, viz výpis 4.13. Přijatá data, která jsou uložena v poli *receivedData*[], jsou načtena do proměnných s názvy *start_symbol_in* a *address_in*, na jejichž základě se následně vyhodnocuje, zda-li došlo k úspěšnému přijetí dat od dotazovaného zařízení.

Výpis 4.13: Vyčítání dat v centrální jednotce, část 2.

```

1  if (received == true) {
2      received = false;
3      start_symbol_in = receivedData[0];
4      address_in = receivedData[1];
5      if (start_symbol_in == '#') {
6          if (address_in == address) {
7              adcvalue = ((receivedData[2] << 8) | receivedData[3]);
8              if ((adcvalue >= 0) && (adcvalue <= 1023)) {
9                  success = true;
10             }
11         }
12     }
13 }
14 i++;

```

Pokud došlo k úspěšnému přijetí znaku „#“ a přijatá adresa se shoduje se zaslouanou adresou, je naplněna proměnná *adcvalue* vyššími 8 bity a nižšími 8 bity. Pokud je hodnota v rozsahu 0–1023, je přenos považován za úspěšný a přepínač *success* je nastaven na true a while již nebude znovu spuštěn. V opačném případě je celý proces proveden znovu a to až 3x. Pokud došlo k úspěšnému přenosu, je zavolána funkce *calculateSoilMoisture()* z výpisu 4.6 v kapitole 4.3, viz výpis 4.14.

Výpis 4.14: Vyčítání dat v centrální jednotce, část 3.

```

1  if (success == true) {
2      moisture = calculateSoilMoisture(adcvalue,
3      (uint8_t)address);
4      return moisture;
5  }
6  else {
7      return 9999.99;
8  }

```

Pokud by nedošlo k úspěšnému přenosu, je navracena hodnota 9999,99 indikující problém v komunikaci.

4.6 Vyčítání rychlosti větru a množství srážek

Jak bylo uvedeno v kapitolách 2.5.4 a 2.5.6, výstupem anemometru a srážkoměru jsou pulzy. K počítání pulzů byl využit 16 bitový binární čítač v kombinaci s posuvným registrem, viz kapitola 3.6. Funkce pro obsluhu čítače a posuvného registru byla

vytvořena na základě datasheetů k těmto integrovaným obvodům[24], [26] a jedná se o zapisování log. 1 a 0 na příslušné piny, respektive vyčítání dat na pinu připojeném k posuvnému registru, tato funkce tedy nebude podrobně rozebírána.

Jakmile je vyčten počet pulzů, k přepočtu pulzů na rychlost větru je použit kód na výpisu 4.15.

Výpis 4.15: Přepočet rychlosti větru

```
1 if (mode == 1) {  
2     windSpd = (windPulses / (double)(sleepTime * 60.0) * 2.4);  
3 }  
4 else {  
5     windSpd = (windPulses /  
6         (double)(count / toSecondFactor) * 2.4);  
7 }  
8 count = 0;
```

V případě, že je zařízení nakonfigurováno v režimu periodického probouzení z režimu spánku, je k výpočtu průměrné rychlosti větru využito času spánku. Pokud se jedná o režim nepřetržitého provozu, slouží k výpočtu rychlosti větru proměnná *count*, která je typu `uint32_t` a je pomocí běžícího čítače inkrementována každou 1 ms. K výpočtu množství srážek je použit jednoduchý součin. Jelikož každý pulz srážkoměru odpovídá množství 0,28 mm srážek, odpadá zde potřeba měřit počet pulzů za určitý časový úsek.

4.7 Automatizovaný sběr naměřených dat

Pokud je zařízení nastaveno na režim periodického probouzení z režimu spánku, naměřená data mohou být zasílána buďto na Thingspeak, nebo vlastní server.

4.7.1 Zasílání dat na Thingspeak

Pro vlastní zasílání dat na Thingspeak slouží knihovna `Thingspeak.h` [34]. K zaslání slouží funkce nazvaná `sendData()`. Po zavolání této funkce dojde nejprve k pokusu o připojení k nakonfigurované WiFi síti. Pokud se nepovede připojit do 20 sekund, data nebudou zaslána a zařízení přejde do režimu spánku. V opačném případě jsou postupně nastavena jednotlivá pole pro hromadné zaslání dat, viz výpis 4.16.

Výpis 4.16: Nastavení polí pro odeslání dat na Thingspeak

```
1 ThingSpeak.begin(client);
2 ThingSpeak.setField(1, temperature);
3 ThingSpeak.setField(2, humidity);
4 ThingSpeak.setField(3, (float)pressure);
5 ThingSpeak.setField(4, windSpd);
6 ThingSpeak.setField(5, angle);
7 ThingSpeak.setField(6, rainAmmount);
8 ThingSpeak.setField(7, uvIndex);
```

Následně jsou pomocí funkce `ThingSpeak.writeFields()` data odeslána na server. Thingspeak umožňuje mít na jednom kanálu pouze 8 polí pro různé senzory, avšak celkový počet sledovaných veličin je 13 a navíc je zasílána i informace o napětí baterie. Z tohoto důvodu jsou po zaslání dat znovu nastavena pole dalšími proměnnými ze zbylých senzorů, které jsou následně zaslány na druhý kanál.

4.7.2 Zasílání dat na vlastní server

K zaslání dat na vlastní server je využito metody HTTP Post. Nejprve jsou do proměnné typu `String` uloženy údaje k odeslání, přičemž jednotlivé proměnné jsou odděleny pomocí znaku `&`, na výpisu 4.17 je uvedena část kódu pro uložení údajů do proměnné typu `String`.

Výpis 4.17: Uložení údajů k odeslání na vlastní server

```
1 String message;
2 message = "teplota=";
3 message += String(temperature, 1);
4 message += "&vlhkost=";
5 message += String(humidity, 1);
6 message += "&tlak=";
7 message += String(pressure, 1);
```

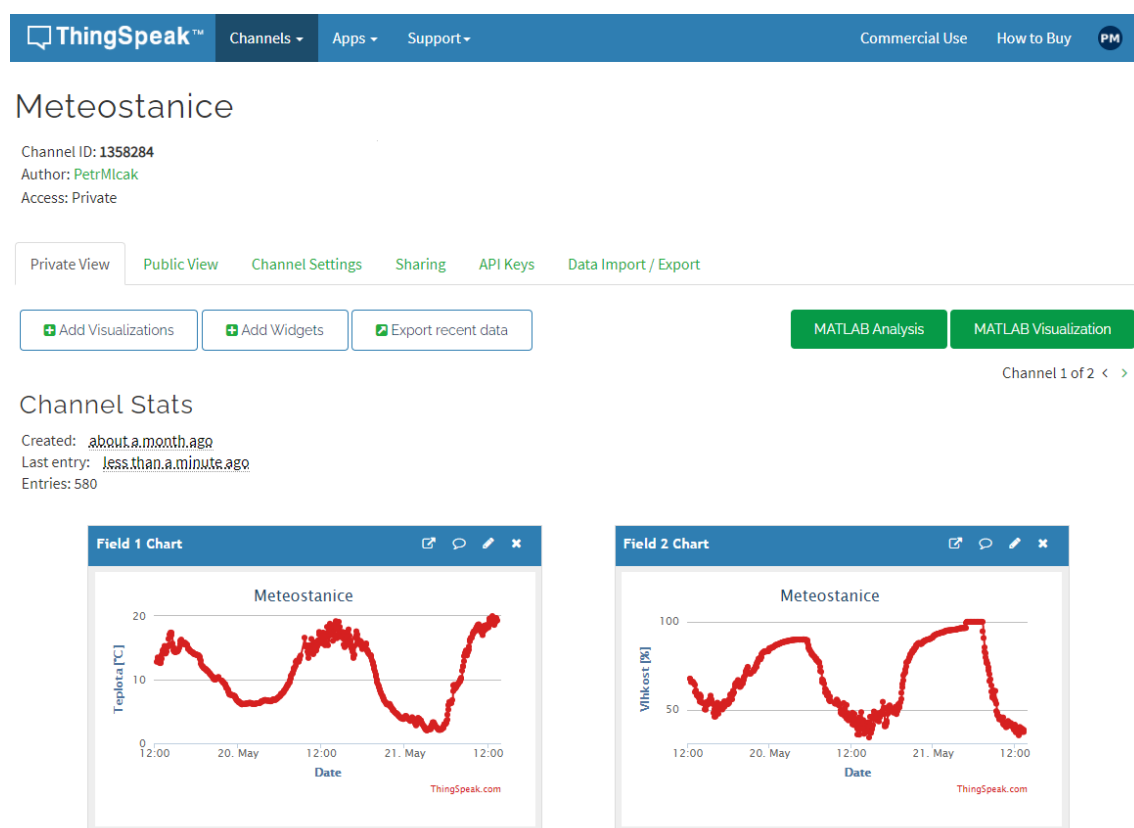
Poté je proveden pokus o připojení k nakonfigurovanému serveru a pokud je pokus úspěšný, jsou data odeslána.

5 Otestování funkčnosti zařízení

V této kapitole je popsán test funkčnosti zasíláním naměřených dat na Thingspeak. Dále je provedeno měření spotřeby.

5.1 Test funkčnosti

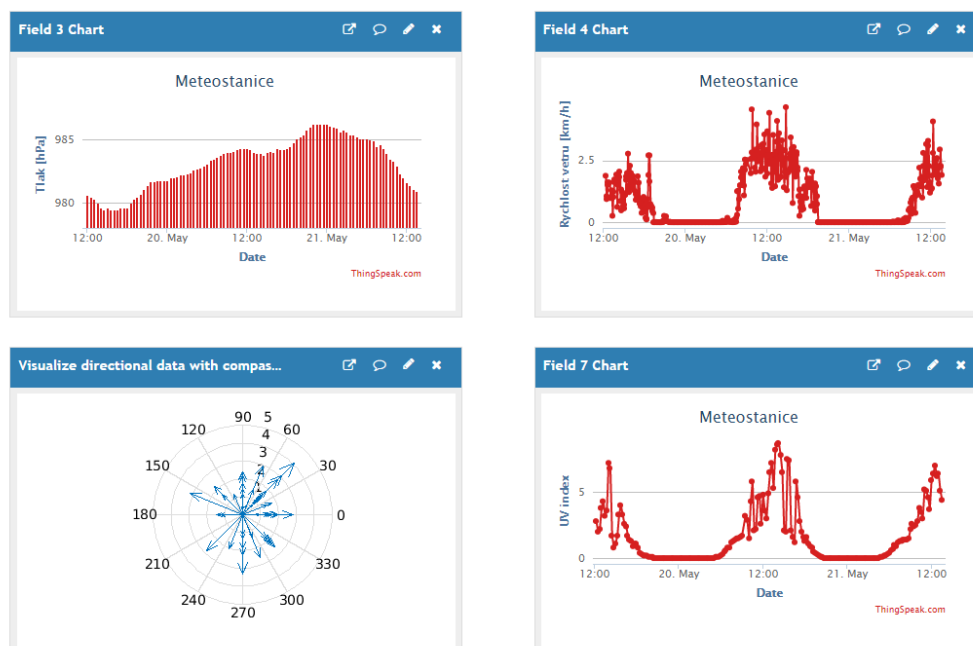
Za účelem otestování funkčnosti bylo zařízení nainstalováno na otevřené prostranství. Měření probíhalo po dobu 48 hodin. Data byla zasílána na Thingspeak každých 5 minut. Na obrázku 5.1 jsou k vidění grafy zobrazující naměřenou teplotu a vlhkost v průběhu testování.



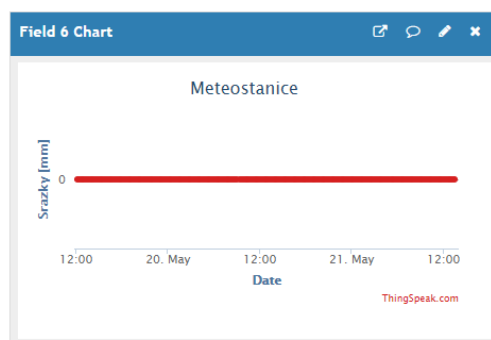
Obr. 5.1: Naměřená teplota a vlhkost.

Na obrázku 5.2 jsou naměřené hodnoty tlaku, rychlosti a směru větru a UV index.

Během testování se nevyskytl žádný déšť, tudíž graf s naměřenými srážkami na obrázku 5.3 neobsahuje žádné naměřené srážky. Během testování bylo převážně polojasno, přičemž jednotlivé výkyvy v intenzitě slunečního záření lze pozorovat na grafu s UV indexem na obrázku 5.2. Nejnižší zaznamenaná teplota 2,0 °C byla zaznamenána 21.5.2021 v 3:14:53. Nejvyšší teplota 20,0 °C byla zaznamenána 21.5.2021



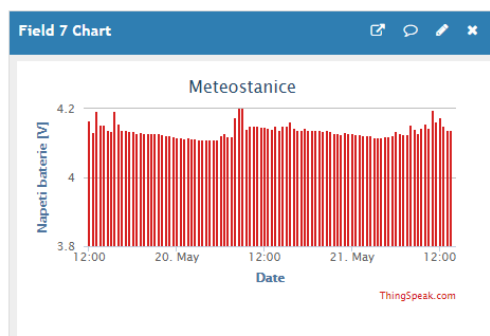
Obr. 5.2: Naměřený tlak, rychlost a směr větru a UV index.



Obr. 5.3: Naměřené srážky.

v 12:42:56. Nejvyšší průměrná rychlost větru během 5 minutového intervalu byla 4,68 km/h dne 20.5.2021 v 14:47:44.

Na grafu na obrázku 5.4 je vidět průběh napětí baterie. Na grafu jsou patrné úseky, kdy nabíjecí obvod spustil nabíjení, přičemž naměřené napětí baterie je v tu chvíli přibližně 4,2 V. Po ukončení nabíjení prakticky ihned poklesne napětí baterie na 4,14 V. V případně dostatečné intenzity slunečního záření dojde při poklesu napětí baterie na 4,12 V k zahájení nabíjení. Z grafu je rovněž patrná energetická soběstačnost, solární panel zvládá bez problému poskytovat dostatek energie k průběžnému nabíjení baterie.



Obr. 5.4: Napětí baterie.

5.2 Měření spotřeby

Naměřená spotřeba v režimu spánku dosahuje hodnoty $37\ \mu\text{A}$. Během měření je spotřeba $79\ \text{mA}$, v případě zasílání dat $118\text{--}130\ \text{mA}$. Pokud je nastaven kontinuální režim, spotřeba s aktivním RF modulem činí $159\ \text{mA}$.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat IoT systém pro zahrádkáře s měřením teploty, vlhkosti, atmosférického tlaku, rychlosti a směru větru, množství dešťových srážek a půdní vlhkosti a teploty v několika hloubkách.

V teoretické části byly rozebrány jednotlivé možnosti měření uvažovaných fyzikálních veličin. Následně byl proveden výběr vhodných senzorů z několika hledisek, jako je přesnost, spotřeba nebo cena.

Dále bylo navrženo výsledné zapojení jak hlavní DPS s vyhodnocovací částí, tak i měřicí DPS s Attiny85. Součástí návrhu je i zapojení čítače s posuvným registrem pro spolehlivé počítání pulzů z anemometru a srážkoměru. Tam, kde je to možné, byly použity i tranzistory pro odpojování senzorů ve chvíli, kdy není nutno zjišťovat atmosférické a půdní údaje. DPS je optimalizována pro bateriový provoz.

Pro zakrytování elektroniky senzoru vlhkosti půdy a uchycení měřicí DPS s Attinou85, která slouží k převedení analogového výstupního signálu ze senzoru na signál digitální, byla navržena krabička určená k výrobě 3D tiskem. Kromě toho byly navrženy a vytištěny držáky anemometru, směrovky, srážkoměru, solárního panelu. Navržen a následně vytištěn byl i radiační štít pro ochranu senzoru teploty, tlaku a vlhkosti před slunečním zářením.

Rovněž byla provedena kalibrace senzorů půdní vlhkosti. Dále bylo vytvořeno webové rozhraní umožňující konfiguraci, mimo jiné volbu, zda-li bude zařízení pracovat v kontinuálním režimu, nebo v režimu periodického probouzení z režimu spánku a následného zasílání dat. V kontinuálním režimu po připojení k WiFi je možno zobrazit si data na webové stránce nebo ve formátu JSON. Rovněž je možno provést změnu konfigurace po zadání přihlašovacích údajů. V režimu probouzení je možno zasílat data na Thingspeak nebo vlastní server.

Zařízení bylo následně otestováno v provozu a rovněž bylo provedeno měření spotřeby. V režimu probouzení je spotřeba při spánku 37 μA , při probuzení a následném odesílání dat je spotřeba 79 mA, respektive maximálně 130 mA. Díky tomu je zařízení při dobíjení 6 W solárním panelem plně soběstačné.

Literatura

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [2] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2057-6.
- [3] SMOLKA, Václav. Vlhkost vzduchu a její charakteristiky. *In-počasi* [online]. Plzeň: InMeteo, c2020, 8. 10. 2013 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <<https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vlhkost-vzduchu/>>
- [4] LEKSHMI, Susha, D.N. SINGH a Maryam SHOJAEI BAGHINI. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* [online]. Elsevier, August 2014, 26.4.2014, 2014(54), 14 [cit. 2020-11-20]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:<<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>>
- [5] SparkFun Soil Moisture Sensor (with Screw Terminals). In: *Flickr* [online]. June 29, 2017 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <<https://www.flickr.com/photos/41898857@N04/35029830063>>
- [6] Vítr. *Meteocentrum* [online]. Meteocentrum.cz, c2007-2020 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <<https://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vitr>>
- [7] KÜHN, Stefan. Anemometer. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=402480>>
- [8] Wind Vane Knowledge. *Ammonit* [online]. Berlin: Ammonit Measurement [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <<https://www.ammonit.com/en/customer-support/knowledge/sensor-knowledge/wind-vane-knowledge/>>
- [9] Srážky. *Meteocentrum* [online]. Meteocentrum.cz, c2007-2020 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <<https://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/srazky>>
- [10] Rain gauge. In: *Flickr* [online]. 30.9.2012 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <<https://www.flickr.com/photos/40385177@N07/8039502019>>
- [11] *DHT22 datasheet* [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>>
- [12] *BME280 Datasheet* [online]. Bosch Sensortec, 2018 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>>

- [13] *DS18B20 datasheet* [online]. Maxim Integrated, c2019 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>
- [14] *SHTC3 datasheet* [online]. Sensirion, c2019 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Datasheets/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTC3_Datasheet.pdf>
- [15] *BMP388 datasheet* [online]. Bosch Sensortec, 2020 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp388-ds001.pdf>>
- [16] *MPL3115A2 datasheet* [online]. NXP, c2018 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPL3115A2.pdf>>
- [17] *VEML 6075* [online]. Vishay, 2016 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <<https://www.vishay.com/landingpage/super12/2016/veml6075.html>>
- [18] *ESP8266EX datasheet* [online]. Espressif Systems, c2020 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf>
- [19] *ESP32 datasheet* [online]. Espressif Systems, c2020 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>
- [20] Regulátor MPPT CN3791 pro solární panel 6V. *Hadex* [online]. Softima, c2011-2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <<https://www.hadex.cz/m464b-regulator-mppt-cn3791-pro-solarni-panel-6v/>>
- [21] *XC6210B332MR datasheet* [online]. TOREX SEMICONDUCTOR [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <<https://www.torexsemi.com/file/x6210/XC6210.pdf>>
- [22] Archiv počasí. *In-pocasi* [online]. Plzeň: InMeteo, c2020 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <<https://www.in-pocasi.cz/archiv/>>
- [23] Počasí, podnebí, voda a kvalita ovzduší v Česku v roce 2016 – vybrané události. *INFOMET* [online]. Praha: ČHMÚ [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <<http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1484297500>>
- [24] *SN74LV8154PW datasheet* [online]. Texas Instruments, c2020 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lv8154.pdf>>

- [25] *74LVC2G14 datasheet* [online]. Nexperia, c2018 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74LVC2G14.pdf>
- [26] *SN74HC165 datasheet* [online]. Texas Instruments, c2020 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc165.pdf>
- [27] *Attiny85 datasheet* [online]. San Jose: Atmel Corporation, c2013 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny45-ATtiny85_Datasheet.pdf
- [28] *74LVC1G11 datasheet* [online]. Nexperia, c2017 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74LVC1G11.pdf>
- [29] *74LVC2G17datasheet* [online]. Diodes Incorporated, c2019 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/74LVC2G17.pdf>
- [30] *PCBWay* [online]. c2019 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.pcbway.com/>
- [31] JANÁČEK, Adam. *Radiační štít pro snímač venkovní teploty*. Brno, 2009. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [32] RADI, Murtiningrum MURTININGRUM, NGADISIH, Fajar MUZDRIKAH, M. SHOHIBUN NUHA a Fathi ALFINUR RIZQI. Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193). *ResearchGate* [online]. August 2018 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/329492087_Calibration_of_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKUSEN0193
- [33] *Pure* [online]. Yahoo, c2014 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://purecss.io/>
- [34] WINTERS, Jason, Rob PURSER, Afan Ahmad KHAN a Vinod. ThingSpeak Communication Library for Arduino, ESP8266 and ESP32. *GitHub* [online]. GitHub, c2021, 9 Dec 2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://github.com/mathworks/thingspeak-arduino>. Version 2.0.0.

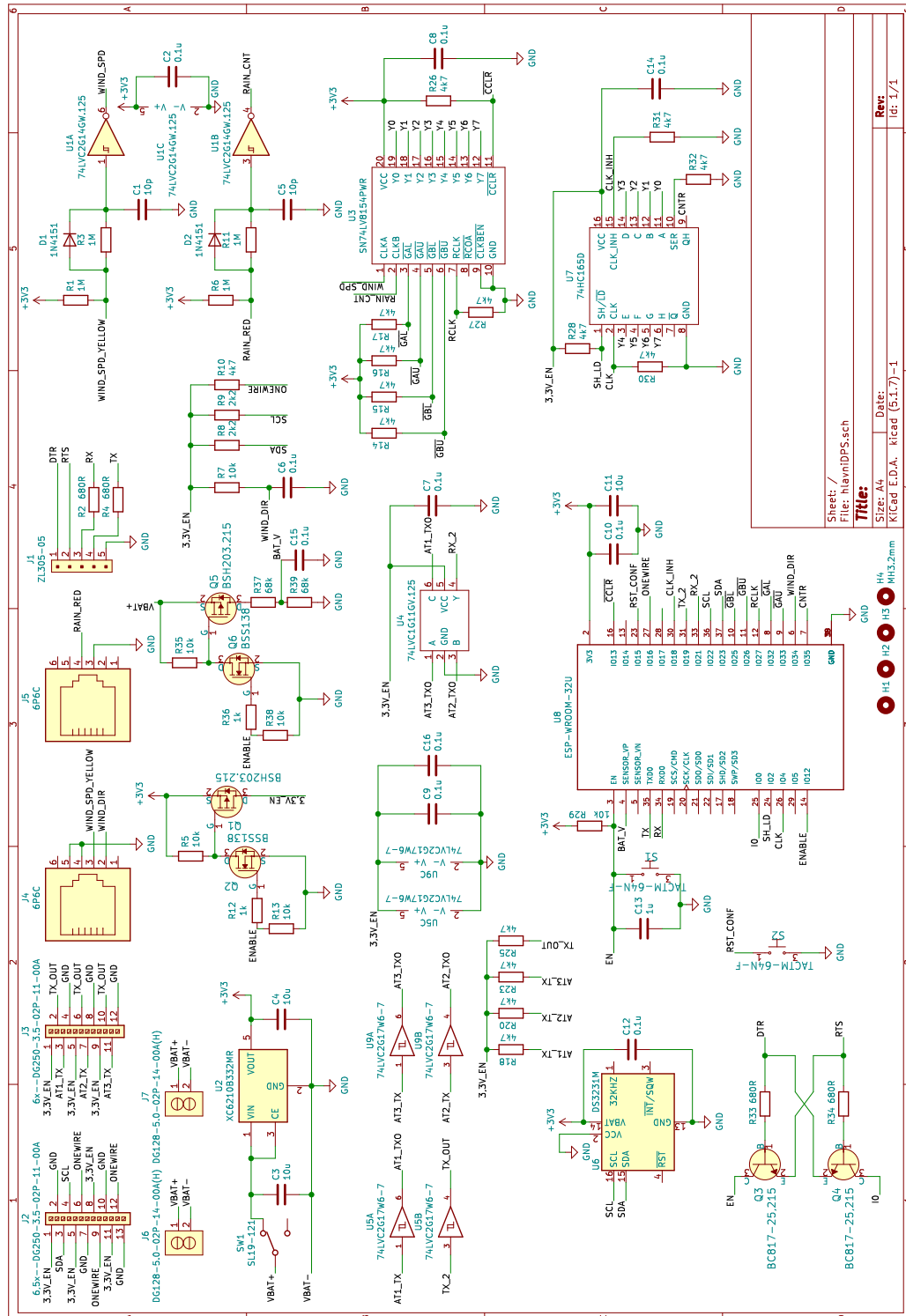
Seznam symbolů a zkratek

IoT	Internet of Things
TDR	Time Domain Reflectometry
FDR	Frequency Domain Reflectometry
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
DPS	Deska plošných spojů
WiFi	Wireless Fidelity
GPIO	General-purpose input/output
ULDO	Ultra-low dropout
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor
PISO	Parallel-in, serial-out
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
HTML	Hypertext Markup Language
CSS	Cascading Style Sheets
AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
JSON	JavaScript Object Notation
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
SPIFFS	SPI Flash File System
XML	Extensible Markup Language
RAM	Random Access Memory

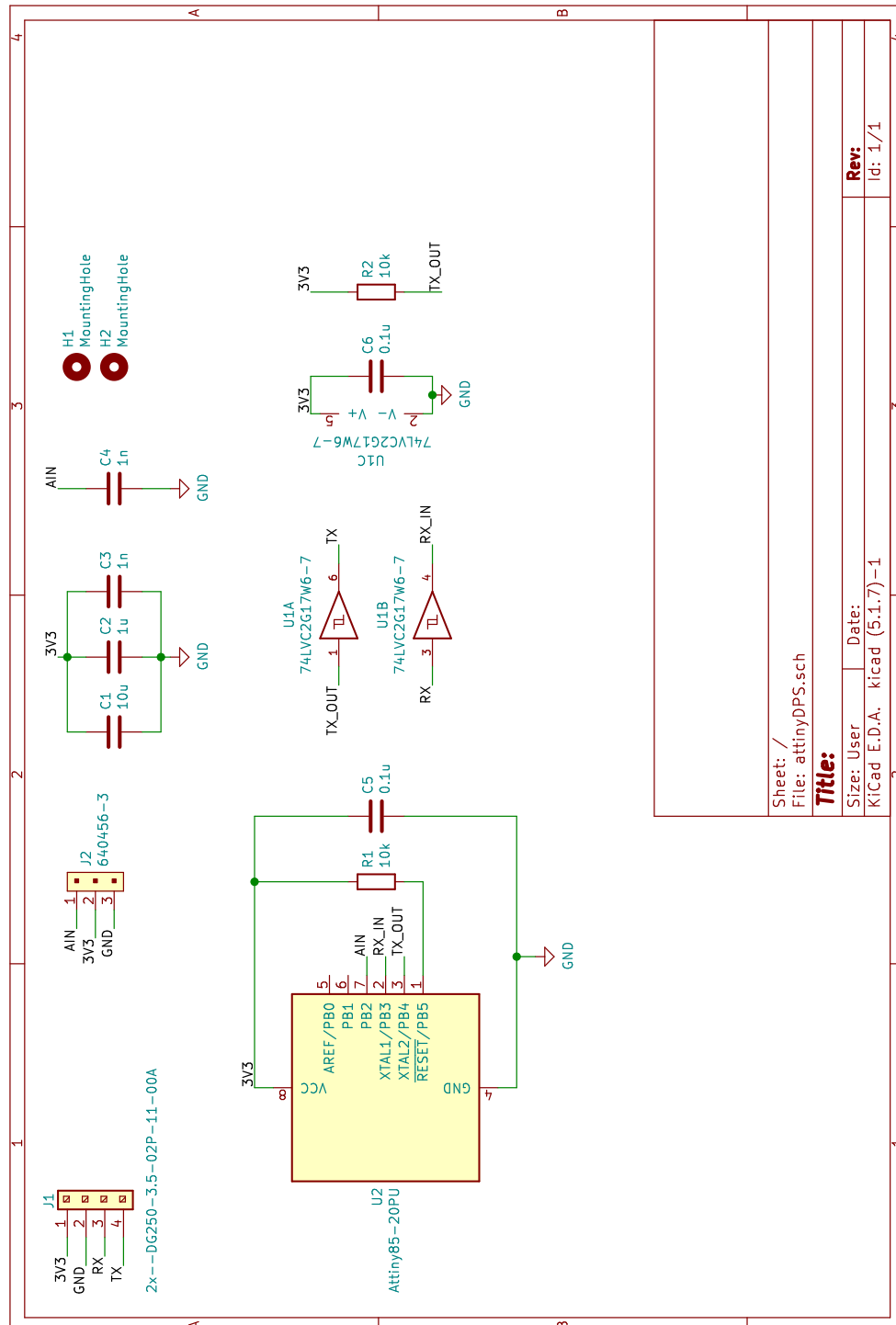
Seznam příloh

A Schéma centrální jednotky	77
B Schéma DPS s Attiny85	78
C Obsah elektronické přílohy	79

A Schéma centrální jednotky



B Schéma DPS s Attiny85



C Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha obsahuje gerber soubory a osazovací plány k navrženým DPS. Dále jsou součástí přílohy zdrojové kódy testované v Arduino IDE 1.8.13. Příloha obsahuje i veškeré navržené 3D modely pro vytisknutí na 3D tiskárně. Přílohy byly rovněž zveřejněny na GitHubu (https://github.com/petrm25/weather_station).

/	Kořenový adresář přílohy
└─ DPS	Adresář se soubory DPS
└─ attinyDPS	
└─ bom	
└─ ibom.html	Osazovací plán desky s Attiny85
└─ gerber	Adresář s gerber soubory pro výrobu DPS
└─ hlavniDPS	
└─ bom	
└─ ibom.html	Osazovací plán desky s ESP32
└─ gerber	Adresář s gerber soubory pro výrobu DPS
└─ Zdrojove_kody	Zdrojové kódy k ESP32 a Attiny85
└─ esp-32	
└─ data	
└─ index.html	
└─ settings.html	
└─ javascript.json	
└─ pure-min.css	
└─ esp-32.ino	
└─ attiny-85	
└─ attiny-85.ino	
└─ 3D modely	Adresář s navrženými držáky
└─ Drzak_anemometru	
└─ drzak_anemometru.step	
└─ drzak_anemometru.stl	
└─ Drzak_baterie	
└─ drzak_baterie_objimka.step	
└─ drzak_baterie_objimka.stl	
└─ drzak_baterie_spodni.step	
└─ drzak_baterie_spodni.stl	
└─ Drzak_ds18b20	
└─ drzak_ds18b20.step	
└─ drzak_ds18b20.stl	
└─ Drzak_smerovky	
└─ drzak_smerovky.step	
└─ drzak_smerovky.stl	
└─ Drzak_solar_charger	
└─ drzak_solar_charger.step	
└─ drzak_solar_charger.stl	

- Drzak_solar_panelu
 - drzak_solar_levy.step
 - drzak_solar_pravy.step
 - drzak_solar_levy.stl
 - drzak_solar_pravy.stl
- Drzak_srazkomeru
 - drzak_srazkomeru.step
 - drzak_srazkomeru.stl
- Krabicka
 - objimka.step
 - objimka.stl
- Ochranna_krabicka
 - objimka.step
 - objimka.stl
 - spodni_dil.step
 - spodni_dil.stl
 - viko.step
 - viko.stl
 - vrchni_dil.step
 - vrchni_dil.stl
- Radiacni_stit
 - STEP
 - Drzak.step
 - Kriz.step
 - Otevreny_plat.step
 - Plny_plat_spodni.step
 - Plny_plat_vrchni.step
 - Plny_plat_vrchni_drzak_bme280.step
 - Spodni_kryt.step
 - Vrchni_kryt_UV_senzor.step
 - STL
 - Drzak.stl
 - Kriz.stl
 - Otevreny_plat.stl
 - Plny_plat_spodni.stl
 - Plny_plat_vrchni.stl
 - Plny_plat_vrchni_drzak_bme280.stl
 - Spodni_kryt.stl
 - Vrchni_kryt_UV_senzor.stl
 - pocet_dilu.txt